

Johannes Rautakoski

Hifi-tasoinen D/A-muunnin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyö

30.5.2013

Tekijä Otsikko	Johannes Rautakoski Hifi-tasoinen D/A-muunnin
Sivumäärä Aika	39 sivua + 4 liitettä 30.5.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	elektroniikan suuntautumisvaihtoehto
Ohjaaja	yliopettaja Matti Fischer
<p>Tässä insinöörityössä suunniteltiin ja toteutettiin kokonaisuudessaan laite, joka voi muuttaa kolme erityyppistä digitaalista signaalia hyvälaatuisiksi analogiseksi linjatasoiseksi signaaliksi.</p> <p>Työn tarkoituksena oli soveltaa insinööriopinnoissa opittua elektroniikkasuunnittelua, digitaalitekniikkaa sekä mittaustekniikkaa. Laitteen kotelon suunnittelussa ja toteutuksessa hyödynnettiin teknisen piirustuksen sekä sähköturvallisuuden oppeja.</p> <p>Laite koostuu jännitelähteestä, digitaalisten signaalien vastaanottomuoduuleista, sisääntulovalitsimesta, S/PDIF-dekooderipiiristä, näytteenottopiiristä, itse D/A-muuntimesta sekä virta-jännite muunnospiiristä.</p> <p>Kytkenän suunnittelun jälkeen jysyttiin piirilevyt sekä koottiin piirilevyt. Kytkenä testattiin moduuli kerrallaan; ensin jännitelähde, sitten USB-vastaanotin ja muut vastaanottomuodut, ja tämän jälkeen itse D/A-muunnin. Testauksen jälkeen laitteesta mitattiin suoritusarvot sekä asennettiin laite itse tehtyyn laitekoteloon.</p> <p>Lopputuloksena saatiin laite, joka täyttää alussa asetetut tavoitteet. Mittaustulosten, subjektiivisen kuuntelun ja ulkonäön perusteella voidaan todeta kyseessä olevan täysin hifi-tasoinen laite.</p>	
Avainsanat	D/A, D/A-muunnin, USB DAC, hifi

Author Title	Johannes Rautakoski High Fidelity Audio Digital to Analog converter
Number of Pages Date	39 pages + 4 appendices 30 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electronics
Instructor	Matti Fischer, Principal Lecturer
<p>In this thesis a fully functional audio digital-to-analog converter was designed and implemented. The device can convert three different types of digital audio signals to an analog line-level sound signal.</p> <p>The purpose of the thesis was to apply the knowledge of the engineering studies, such as electronics designing, digital and measurement technology, technical drawing and electrical safety.</p> <p>The device consists of a voltage source, receiving modules of the digital signals, input selector, S/PDIF decoder circuit, a sample rate converter, D/A converter itself and the current-voltage conversion circuit.</p> <p>After the circuit diagram was designed, the printed circuit boards were milled and the printed circuit boards were assembled. The circuit was tested module after module: first the voltage source, then USB receiver and the other receiving modules and at last the D/A converter itself. After the electrical testing, the performance of the device was measured and the circuit boards and transformer were mounted into the self-made case.</p> <p>The result of this study is device that meets the requirements set at the beginning. Based on the measurements which were carried out, subjective listening and outlook of the device, the result can be referred to as a hifi device.</p>	
Keywords	DAC, Hi-fi, Audio, Digital, D/A

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	D/A-muunnin	2
2.1	D/A-muuntimen toimintaperiaate	2
2.2	Laitteen suunnittelu	3
2.2.1	Jännitelähde	3
2.2.2	S/PDIF-vastaanottomoduulit	7
2.2.3	Sisääntulovalitsin	9
2.2.4	USB-vastaanottomoduuli	9
2.2.5	S/PDIF-dekooderi	11
2.2.6	Näytteenottopiiri	13
2.2.7	D/A-muunnin	16
2.2.8	I/V-muunnin ja alipäästösuodattimet	18
2.3	Piirilevy	20
3	D/A-muuntimen kotelo	23
3.1	Kotelon suunnittelu	23
3.2	Kotelon toteutus	24
4	Mittaustulokset	27
4.1	Jännitelähteen mittaus	27
4.2	D/A-muuntimen mittaukset	30
4.2.1	Taajuusvaste	30
4.2.2	Kokonaisharmoninen särö ja kohina	31
4.2.3	Signaali-kohinasuhde	33
4.2.4	Ylikuuluminen	36
5	Yhteenveto	37

Liitteet

Liite 1. Jännitelähteen kytkentäkaavio

Liite 2. D/A-muuntimen kytkentäkaavio

Liite 3. Jännitelähteen piirilevykuva

Liite 4. D/A-muuntimen piirilevykuvat

Lyhenteet ja käsitteet

CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> ; tietokoneavusteinen valmistus
ESR	<i>Equivalent series resistance</i> ; ekvivalenttinen sarjavastus
I ² S	<i>Integrated Interchip Sound</i> ; vähintään kolmijohtiminen sarjamuotoinen väylä, jolla digitaaliset laitteet voidaan yhdistää
PCM	<i>Pulse-code modulation</i> ; digitaalinen ääni-informaatio on ilmaistu tietyllä näytteenottotaajuudella ja bittisyydellä
PSRR	<i>Power supply rejection ratio</i> ; käyttöjännitteen häiriöiden vaimennussuhde
S/PDIF	<i>Sony/Philips Digital Interface Format</i> ; kuluttajille suunnatussa audioelektronikassa käytettävä äänen siirtoprotokolla
TOSLINK	kuluttajille suunnattu standardoitu äänen optinen siirtotie
TTL	<i>Transistor-transistor logic</i> ; 5 V on looginen 1, 0 V on looginen 0

1 Johdanto

Tässä insinöörityössä suunnitellaan ja toteutetaan laite, joka muuttaa kuluttajaelektronikassa käytettävän S/PDIF-äänisignaalin linjatasoiseksi analogiseksi signaaliksi.

Äänisignaalin digitaali-analogiamuuntimia käytämme jatkuvasti huomaamatta. Niitä esiintyy aina laitteissa, missä jokin digitaalinen äänitieto, bitti muutetaan kuultavaksi ääneksi, siis analogiseksi signaaliksi. Tästä on esimerkkeinä televisio, puhelin tai tietokone.

Parin viimevuoden aikana D/A-muunnin, tunnetaan myös nimellä *DAC* (Digital to Analog Converter), on ollut äänentoistoharrastajien suosiossa. Syy on yksinkertainen: yhdellä laitteella saadaan melkein mikä tahansa digitaalista äänisignaalia syöttävä laite kuulostamaan hyvältä. Vanha cd-soitin liitetään yhdellä kaapelilla D/A-muuntimeen ja ääni voi kuulostaa samalta kuin 10 kertaa kalliimpi high-end cd-soitin.

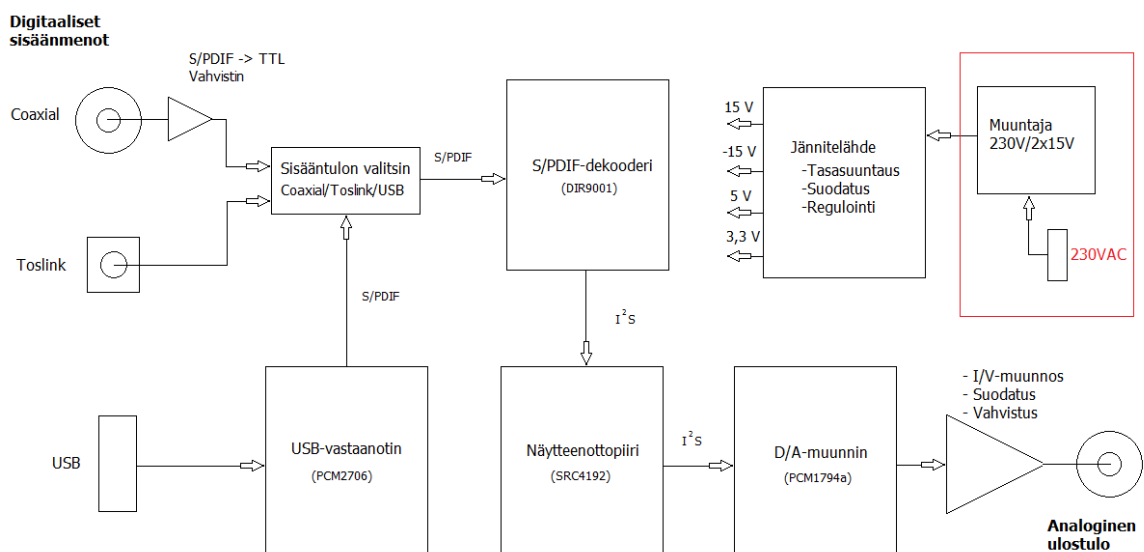
2 D/A-muunnin

2.1 D/A-muuntimen toimintaperiaate

D/A-muuntimessa PCM-muotoinen (Pulse-code modulation) digitaalinen ääni-informaatio, eli bitit, muutetaan jännite- tai virtavaihteluksi. Näytteenottotaajuus määrittää kuinka monta kertaa sekunnissa yksi bitti muuttuu jännite- tai virta-arvoksi. Esimerkiksi tässä työssä D/A-muunnin, eli PCM1794a-piiri, käyttää 192 kHz:n näytteenottotaajuutta, jolloin näytteitä otetaan sekunnissa 192 000 kappaletta. Nyquistin teoreeman mukaan näytteenottotaajuus tulisi olla vähintään kaksinkertainen korkeinta käytettävää taajuutta kohden, jotta signaali ei vääristyisi. Koska ihmisen kuuloalue yltää noin 22 kHz:iin, tulisi näytteenottotaajuuden olla vähintään 44 kHz.

D/A-muuntimen bittisyys tarkoittaa, kuinka monella bitillä rekonstruoitavan signaalin jännite- tai virta-arvot voidaan ilmaista. Eli jokainen näyte ilmaistaan D/A-muuntimen tarjoamalla tarkkuudella. Tässä työssä D/A-muunnin tukee 24 bitin tarkkuutta, jolloin näyte voidaan ilmaista noin 16 miljoonalla erilaisella arvolla. Mitä enemmän arvoja näyte voi saada, sitä tarkemmin alkuperäinen signaali saadaan rekonstruoitua. [1.]

Jotta D/A-muunninpiiri pystyy muuttamaan digitaalisen ääni-informaation jännitevaihteluksi, tarvitsee se ympärille muutakin elektroniikkaa. D/A-muunnin tässä työssä koostuu lohkokaaviossa (kuva 1) esitetyistä moduuleista:



Kuva 1. D/A-muuntimen lohkokaavio

2.2 Laitteen suunnittelu

2.2.1 Jännitelähde

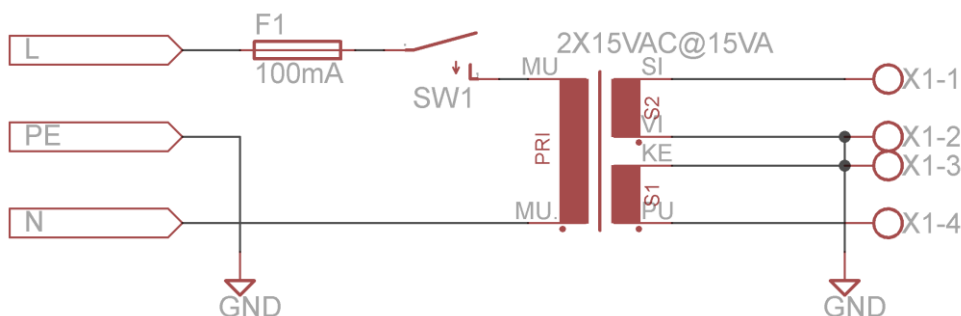
Jännitelähdettä voidaan tässä työssä katsoa kolmena eri osiona: muuntajana, tasasuuntaus- ja suodatuspiirinä sekä regulointipiirinä. Muuntajan tarkoitus on erottaa laite galvaanisesti verkkojännitteestä sekä alentaa vaihtojännitettä. Tasasuuntaus- ja suodatuspiirin tarkoitus on tasasuunnata ja suodattaa muuntajalta tuleva vaihtojännite. Regulointipiiri suodattaa, vakavoi ja alentaa jännitettä D/A-muuntimelle sopivaksi.

D/A-muunnin oheispiireineen tarvitsee +3,3 V, +5 V ja ± 15 V. *Ripple*-jännite eli jännitteen vaihtelu tulisi olla alle 10 mV_{pk-pk} . Virrantarve maksimikuormituksella näkyy taulukossa 1:

Taulukko 1. Virrankulutus komponentein

IC-piiri/komponentti	3,3 V:n jännitelinja (mA)	5 V:n jännitelinja (mA)	± 15 V:n jännitelinja (mA)
PCM1794A	45	37	-
SRC4192	68	-	-
PCM2706	30	-	-
DIR9001	17	-	-
2 x OPA2107	-	-	$\sim \pm 30$
2 x OPA1611	-	-	$\sim \pm 30$
MCP100	-	~ 1	-
74HC08	-	50	-
LED	-	10	-
Oskillaattori	15	-	-
Reed rele	-	35	-
TORX173	40	-	-
Yhteensä:	215 mA	133 mA	± 60 mA

Muuntajaksi valittiin kahdella 15 V:n toisiolla ja yhdellä 230 V:n ensiöllä oleva Multi-compin valmistama 15 VA:n rengassydänmuuntaja. Pakkamuuntajan sijaan valittiin rengassydänmuuntaja sen pienen koon ja painon sekä pienen magneettisen häiriökentän takia.



Kuva 2. Muuntajan kytkentä

Verkojännite tuodaan koteloon takapaneelissa olevan IEC C14 -runkoliittimen kautta. Liittimestä lähtevä vaihejohdin (L) viedään sulakkeen kautta kotelon etulevyssä olevalle kytkimelle. Sulakkeena käytettiin 100 mA hidasta lasiputkisulaketta (kuva 2), jotta vika-tilanteessa muuntaja kytkeytyy irti verkkojännitteestä. Alun perin tarkoituksena oli käyttää IEC-runkoliitintä, jossa olisi ollut samassa 5 mm x 20 mm sulakerasia, mutta halutun kotelon korkeuden takia sitä ei voitu käyttää.

Muuntajan toisiot kytketään sarjaan (VI ja KE yhdistetään) ja sarjaan kytkennän yhdyspiste toimii jännitelähteen nollapotentiaalina (kuva 2). Sarjaan kytkettyjen toisioiden (SI ja PU) jännite kokoaaltotasasuunnataan jolloin maatasoa vasten näkyy kaksipuoleinen tasasuunnattu jännite. Kokoaaltotasasuuntauksen jälkeen laskennallinen ulostulojännite

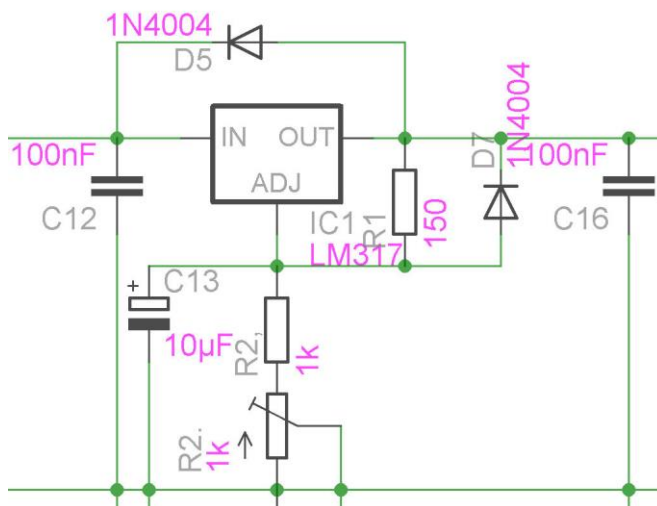
$$U = \sqrt{2} * 15 \text{ V} = 21,2 \text{ V}. \quad (1)$$

Suodatuskondensaattorin jännitekeston mitoituksessa tulee ottaa huomioon myös tasasuuntaussillan tuoma jännitehäviö, sekä muuntajan tyhjäkäyntijännitteen suuruus. Tasasuuntausdiodeiksi valittiin ultranopea MUR880, jonka jännitehäviö on datalehden mukaan maksimissaan noin 1,1 V. [2] Muuntajan kuormittamaton jännite voi valmistaja mukaan vaihdella 16 %. Kondensaattorin jännitekestoksi voitaisiin siis ottaa 25 V, mutta tässä tapauksessa valittiin varmuuden ja saatavuuden vuoksi 35 V.

Tasasuuntauksen jälkeinen kaksipuoleinen jännite suodatetaan. Suodatuksessa olisi hyvä käyttää erityyppisiä kondensaattoreita, sillä eri materiaaleilla on erilainen impedanssi taajuuden suhteen. Matalataajuisille häiriöille suodatuskondensaattoreina käytetään laadukkaita Panasonicin FC-sarjan alumiinielektrolyytti kondensaattoreita. Kyseisillä elektrolyyttikondensaattoreilla on matala *ESR*-sarjavastus ja vastusta pienennettiin

vielä käyttämällä kolmea elektrolyyttikondensaattoria rinnakkain. Korkeille häiriötaajuuksille käytettiin Wiman 100 nF:n polyesterikondensaattoreita sekä 100 nF:n keramisia kondensaattoreita. Elektrolyyttikondensaattorit mitoitettiin niin, että *ripple*-jännite tasasuuntauksen jälkeen olisi alle 1 V.

Tasasuuntauksen jälkeen reguloidaan operaatiovahvistimien tarvitsema kaksipuoleinen käyttöjännite. Positiivinen 15 V:n jännite reguloidaan 1,5 A:n LM317-regulaattorilla ja negatiivinen 15 V:n jännite 1,5 A:n LM337-regulaattorilla. LM317- ja LM337-regulaattoreissa ulostulojännitteen V_o :n voi määrittää kahden ulkoisen vastuksen avulla ADJ-nastaa käyttäen (kuva 3).



Kuva 3. Regulaattorin kytkentäkaavio

Datalehdessä saadaan kaava ulostulojännitteelle

$$V_o = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2, \quad (2)$$

jossa $V_{REF} = 1,25 \text{ V}$ ja $I_{ADJ} = 50 \mu\text{A}$.

Koska ulostulojännite halutaan säätää mahdollisimman tarkasti, valittiin toiseksi vastukseksi säädettävä vastus. Vastus R_1 voidaan valita 100 Ω - 1 000 Ω :n väliltä, joten R_1 on tässä tapauksessa 150 Ω . R_2 koostuu kahdesta vastuksesta, kiinteästä 1 000 Ω :n vastuksesta ja säädettävästä 1 000 Ω :n vastuksesta.

Kaavasta 2 saadaan ulostulojännitteen vaihteluväliksi:

$$V_{o\ MIN} = 1,25\ V \left(1 + \frac{1\ 000\ \Omega}{150\ \Omega} \right) + 50\ \mu A * 1\ 000\ \Omega = 9,65\ V$$

$$V_{o\ MAX} = 1,25\ V \left(1 + \frac{2\ 000\ \Omega}{150\ \Omega} \right) + 50\ \mu A * 2\ 000\ \Omega = 18,04\ V$$

Reguloitu $\pm 15\ V$:n jännite suodatetaan $220\ \mu F$:n ja $470\ \mu F$:n Panasonicin FC-sarjan alumiinielektrolyytti kondensaattoreilla sekä $100\ nF$:n keraamisilla kondensaattoreilla.

Jotta *ripple*-jännite saataisiin mahdollisimman pieneksi, pelkät regulaattoreiden ulostulokondensaattorit eivät riitä. Siitä syystä myös ADJ-nastasta viedään $10\ \mu F$:n *low-esr*-kondensaattori maatasoon.

Positiivisesta $15\ V$:n linjasta muodostetaan esiregulointi TLV1117-regulaattorilla, koska $+5\ V$:n ja $3,3\ V$:n regulaattoreilla maksimi sisääntulojännite on $5,5\ V$. TLV1117 on myös säädettävä regulaattori, ja se noudattaa samaa kytkentäkaaviota kuin LM317- ja LM337-regulaattorit (kuva 3). Ulostulojännite voidaan siis määrittää samalla tavalla kuin LM317/LM337-regulaattoreilla. Jännite lasketaan siten, että se on säädettävissä $5,5\ V$:iin. Valitaan vastuksen R_1 arvoksi $270\ \Omega$. R_2 koostuu kahdesta vastuksesta, kiinteästä $500\ \Omega$:n vastuksesta ja säädettävästä $1\ 000\ \Omega$:n vastuksesta.

Kaavasta 2 saadaan ulostulojännitteen vaihteluväliksi:

$$V_{o\ MIN} = 1,25\ V \left(1 + \frac{500\ \Omega}{270\ \Omega} \right) + 50\ \mu A * 500\ \Omega = 3,60\ V$$

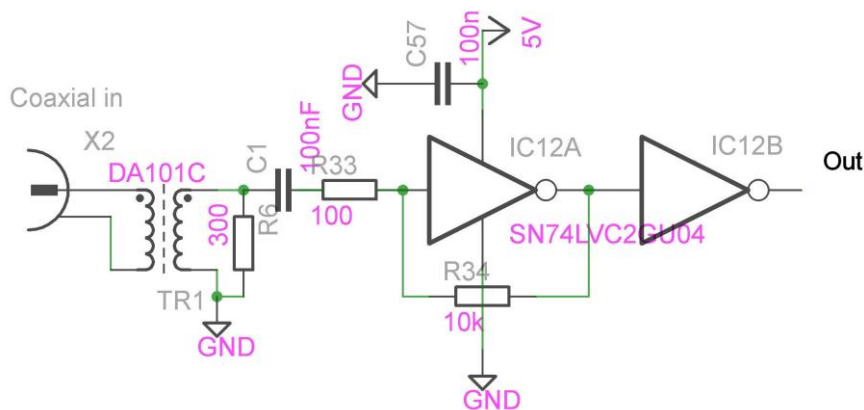
$$V_{o\ MAX} = 1,25\ V \left(1 + \frac{1\ 500\ \Omega}{270\ \Omega} \right) + 50\ \mu A * 1\ 500\ \Omega = 8,29\ V$$

$5,5\ V$:n jännite suodatetaan $47\ \mu F$:n audiokäyttöön suunnitellulla Elnan Silmic II -kondensaattorilla sekä $100\ nF$:n keraamisella kondensaattorilla ja viedään $5\ V$:n ja $3,3\ V$:n regulaattoreille.[3.]

$5\ V$:n ja $3,3\ V$:n regulaattorit ovat samaa kiinteällä ulostulojännitteellä olevaa Texas Instrumentin TPS796xx *low-drop* -regulaattorisarjaa, joille luvataan erittäin pieni ulostulojännitteen kohina, korkea *PSRR*-arvo sekä $800\ mA$:n ulostulovirta. $5\ V$:n ja $3,3\ V$:n

Sähköinen S/PDIF-signaali otetaan vastaan yhdellä RCA-liittimellä. Signaali erotetaan galvanisesti signaalia syöttävästä laitteesta Muratan valmistamalla DA101C 1:1 -signaalimuuntajalla. Muuntajalla estetään mahdollisten maalenkkien kytkeytyminen laitteiden välille.

S/PDIF-signaali ei ole TTL-tasoinen, vaan sen jännite on noin $0,5 V_{pk-pk}$. Signaali vahvistetaan TTL-tasoiseksi SN74LVC2GU04-kaksois-invertterillä tehdyllä vahvistimella (kuva 5).



Kuva 5. S/PDIF-signaalin vahvistin

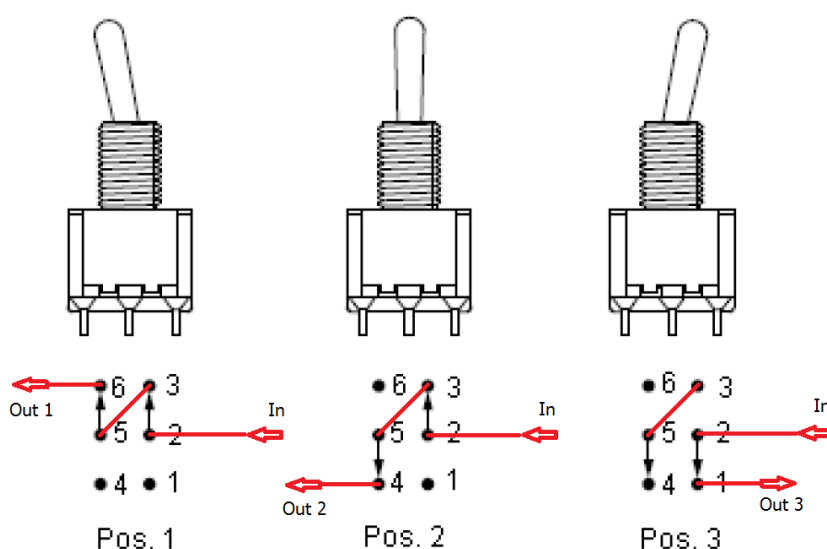
Mahdollinen tasajännite suodatetaan pois sisään tulevasta signaalista 100 nF:n polyesterikondensaattorilla. Koska kyseessä on 75 Ω :n siirtolinja, päätetään signaali 75 Ω :n vastuksella. Tästä huolehtivat vastukset R6 ja R33.

Vahvistimen vahvistus määräytyy vastuksien R33 ja R34 suhteesta, eli vahvistus on noin 100-kertainen. Sisään tulevan signaali ollessa $0,5 V_{pk-pk}$ ja käyttöjännitteen ollessa 3 V saadaan vahvistimen ulostulosta $-3 V_{pk-pk}$. Vahvistettu negatiivinen signaali puskuroidaan ja invertoidaan IC12B:llä.[5.]

TOSLINK- ja koaksiaali-vastaanottomoduuleista TTL-tasoinen S/PDIF-signaali viedään sisääntulovalitsimelle.

2.2.3 Sisääntulovalitsin

Käytettävä sisääntulosignaali voidaan valita laitteen etupaneelissa olevalla kolmiasentoisella vipukytkimellä. Työssä käytettiin kolmiasentoista *on-on-on* DPDT -kytkintä (Double Pole Double Throw), josta tehtiin hyppylangan avulla SP3T-kytkin (Single-Pole Triple Throw) (kuva 6).



Kuva 6. Sisääntulovalitsin

Kytkimellä ei suoraan valita käytettävää signaalia, vaan sillä ohjataan *reed*-releitä, jotka kytkevät halutun TTL-tasoisin S/PDIF-signaalin dekooderipiirille. Releitä käyttämällä saavutetaan lyhempi signaalitie sekä parempi toimintavarmuus.

Reed-releissä on kaksi vaihtokosketinta, joista toisella valitaan signaali, ja toinen kytkee kyseisen sisääntulon 3 mm merkkivalon päälle. Merkkivaloina toimivat ledit, jotka on sijoitettu etupaneeliin ilmoittamaan käyttäjälle, mikä sisääntulo on valittuna.

Releiden kelan rinnalle on laitettu diodi estämään virran poiskytkemisen jälkeisen itseinduktion aiheuttaman jännitepiikin leviämisen muualle piiriin.

2.2.4 USB-vastaanottomoduuli

USB-linjasta tuleva data otetaan vastaan Texas Instrumentin valmistamalla PCM2706-piirillä. Piirin tarkoitus on muuttaa USB:stä tuleva digitaalinen äänisignaali

dekooderiin ymmärtämään S/PDIF-muotoon. USB-vastaanotinpiirissä on itsessään sisäänrakennettu D/A-muunnin, mutta sitä ei käytetty, koska haluttiin käyttää parempilaatuista erillispiiriä.

Piiri toimii USB 1.1 standardin mukaan ja tietokoneet Windows 98 -käyttöjärjestelmästä ylöspäin tunnistavat laitteen *USB AUDIO DAC*:ina ilman erillisiä ajureita. Piiri tukee 16 bitin tarkkuutta: 32, 44,1, ja 48 kHz:n näytteenottotaajuudella.

USB-vastaanotin tarvitsee toimiakseen 12 MHz:n kellopulssin. Kellopulssi luodaan käyttäen piirin omaa sisäistä oskillaattoria. Oskillaattori vaatii ulkoisen 12 MHz:n kiteen, sekä kiteen rinnalle 1 M Ω :n vastuksen ja kiteestä riippuvan kuormakapasitanssin. Kiteeksi valittiin TXC:n valmistama 7B-12.000MEEQ-T -kide, joka vaatii kuormakapasitanssiksi 10 pF:n kondensaattorit. Kide kytketään piirin nastoihin XTI (nasta 12) ja XTO (nasta 13). (Ks. liite 2, D/A-muuntimen kytkentäkaavio.)

Piiri voidaan kytkeä toimimaan joko suoraan USB:stä saatavalla 5 V:n jännitteellä (*BUS-powered*) tai ulkoisella 3,3 V:n jännitteellä (*self-powered*). Tässä työssä haluttiin käyttää parempilaatuista ulkoista jännitettä, sillä USB:stä saatavassa jännitteessä on enemmän vaihtelua ja häiriöitä. Käytettävän jännitteen määrittäminen tehdään kytkemällä PSEL-nasta (nasta 16) nollassa. HOST-nasta (nasta 3) määrittää maksimivirrankulutuksen. HOST-nastan ollessa nollassa, virrankulutus on 100 mA ja loogisessa ykkösessä virrankulutus on 500 mA. Ulkoista jännitettä käytettäessä HOST-nasta kytketään USB-portin 5 V:n jännitteeseen 10 k Ω :n alavetovastuksen kanssa.

USB-vastaanotinpiiristä voidaan valita, minkälaisessa muodossa digitaalinen ulostulo halutaan. Vaihtoehtoina on I²S-väylä tai S/PDIF-signaali. Valitaan FSEL-nastaa (nasta 9) käyttäen ulostuloformaattiksi haluttu S/PDIF-signaali. Ulostuleva signaali saadaan DOUT-nastasta (nasta 17) ja se viedään suoraan sisääntulovalitsimelle.

USB:ltä tuleva data kulkee D+ -johtimesta (vihr.) piirin D+ -nastaan (nasta 23) ja D- -johtimesta (valk.) D- -nastaan (nasta 22). D+ kytketään 1,5 k Ω ylös vetovastuksella käyttöjännitteeseen, jotta tietokone tunnistaa, milloin laite on kytkettynä sen USB-porttiin. Ulkoista jännitettä käytettäessä ylös vetovastukseen ei kuitenkaan saa syöttää 3,3 V jännitettä, jos USB:tä ei ole kytketty tietokoneeseen. Tästä syystä käytettiin 74HC08

AND -porttia. *AND*-portin toiseen sisääntuloon tulee USB:ltä 5 V:n jännite ja toinen sisääntulo kytketään 3,3 V:n jännitteeseen. *AND*-portin ulostulosta kytketään 1,5 k Ω ylös vetovastus D+ -linjaan.

Analogiapuolen (V_{CCP} , nasta 2) ja digitaalipuolen (V_{DD} , nasta 21) 3,3 V:n käyttöjännitteet suodatetaan lähelle nastoja asennettavilla 10 μ F:n Elna Silmic II -kondensaattoreilla, sekä 1 μ F:n keraamisilla kondensaattoreilla. Piirin sisäisen kuulokevahvistimen käyttöjännitteet (V_{CCL} , V_{CCR} , nastat 27 ja 30) suodatetaan 1 μ F:n keraamisilla kondensaattoreilla ja kytketään myös 3,3 V:n jännitteeseen. AGNDL (nasta 26), AGNDR (nasta 31), DGND (nasta 20), PGND (nasta 1) ja ZGND (nasta 25) kytketään yhteiseen digitaalipuolen maatasoon.

Sisäinen D/A-muunnin tarvitsee käyttöjännitteen, joka on puolet analogiapuolen käyttöjännitteestä. Piiri itsessään luo jännitteen, mutta V_{COM} -nastasta (nasta 32) täytyy kytkeä ulkoinen 10 μ F:n suodatuskondensaattori maatasoon.

DATA-nasta (nasta 15) kytketään 1,5 k Ω :n vastuksen kautta ja TEST-nasta (nasta 10) ilman vastusta 3,3 V:n käyttöjännitteeseen. [7.]

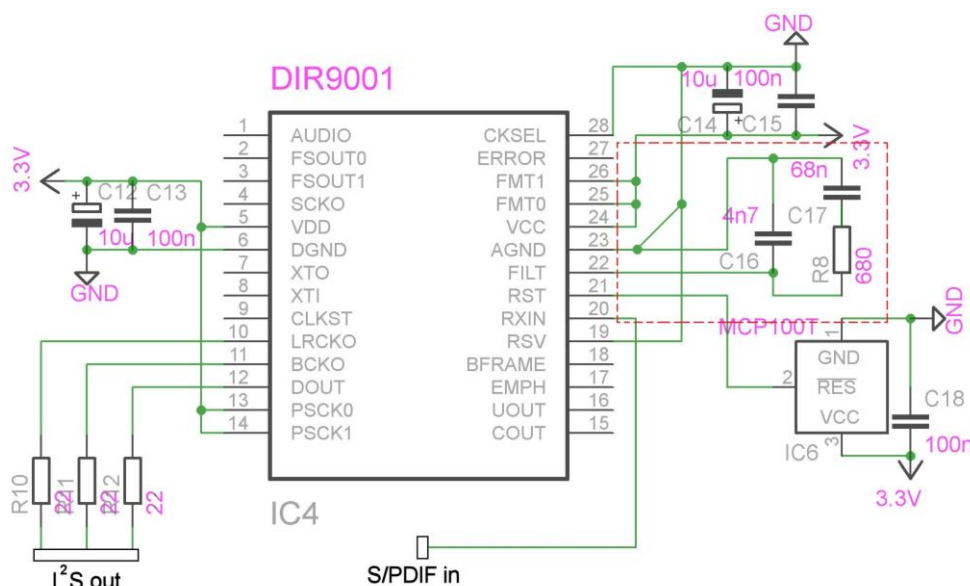
2.2.5 S/PDIF-dekooderi

Sisääntulovalitsimen jälkeen haluttu signaali viedään DIR9001-dekooderipiirille. Dekooderi ottaa vastaan S/PDIF-signaalin ja muuttaa sen näytteenottopiirin ymmärtämään I²S-muotoon. TTL-tasoinen S/PDIF-signaali syötetään piirin RXIN-nastaan (nasta 20). Dekooderi hyväksyy sisään tulevaa signaalia 24 bitin tarkkuudella ja 28 - 108 kHz:n näytteenottotaajuudella.

Dekooderi vaatii ulkoisen *reset*-signaalin RST-nastaan (nasta 21), kun piiri käynnistyy. Käyttöjännitteen noustessa 2,7 V:in on RST-nastaan tultava vähintään 100 ns:n pituinen *reset*-jakso. *Reset* on silloin aktiivinen, kun se on loogisessa nollassa. Piirin resetointi tehdään ulkoisella MCP100T-*reset*-piirillä. *Reset*-piiri tarkkailee 3,3 V:n käyttöjännitettä, ja kun sen taso on ylittänyt 2,7 V:n raja, vetää se RST-nastan maatasoon. *Reset*-piiri pitää RST-nastaa maahan kytkettynä noin 350 ms:n ajan.[6.]

Dekooderi ei tarvitse ulkoista kellopulssia, vaan se ottaa sisään tulevasta S/PDIF-signaalista vaihelukitun silmukan avulla tarvitsemansa kellon. PLL (Phase-Locked Loop) aktivoidaan kytkemällä CKSEL-nasta (nasta 28) nollatasoon. Kellon toimintataajuuden voi valita käyttäen PSCK0 (nasta 14) ja PSCK1 (nasta 15) -nastoja. Kytetään kumpikin valintanasta loogiseen ykköseen, jolloin sisäiseksi kellotaajuudeksi tulee 512fs, missä fs on sisään tulevan signaalin näytteenottotaajuus. Nopeimmalla sisäisellä kellolla saavutetaan pienin aika tasossa tapahtuva virhe, eli *jitter*.

Vaihelukittu silmukka tarvitsee luotettavaan toimintaan ulkoisen suodatuspiirin FILT-nastaan (nasta 22). Datalehdessä on ilmoitettu tarkkaan, millainen suodin tulee olla, miten komponentit tulee sijoittaa piirilevylle, sekä minkälaiset toleranssit komponenteilla saa olla. Kuvassa 7 esitetään koko dekodeeripiirin kytkentäkaavio. Kuvassa on punaiselle katkoviivalla ympyröity vaihelukitun silmukan suodin.



Kuva 7. Dekodeeripiiri ja vaihelukitun silmukan suodin

Nastoista LRCKO (nasta 10), BCKO (nasta 11) ja DOUT (12) saadaan signaali I²S-mudossa ulos. Jokaiseen I²S-väylän johtimeen laitetaan 22 Ω:n virranrajoitusvastus ennen kuin signaali viedään näytteenottopiirille. Ulostulevan signaalin näytteenottotaajuus ja bittisyys riippuu sisään tulevasta signaalista.

3,3 V:n käyttöjännite (V_{CC} ja V_{DD} , nastat 5 ja 24) suodatetaan lähelle piirin nastoja asennettavilla 10 µF:n Elna Silmic II -kondensaattoreilla, sekä 100 nF:n keraamisilla kondensaattoreilla. Piirin digitaalimaa (nasta 6), analogiamaa (nasta 23) sekä piirin

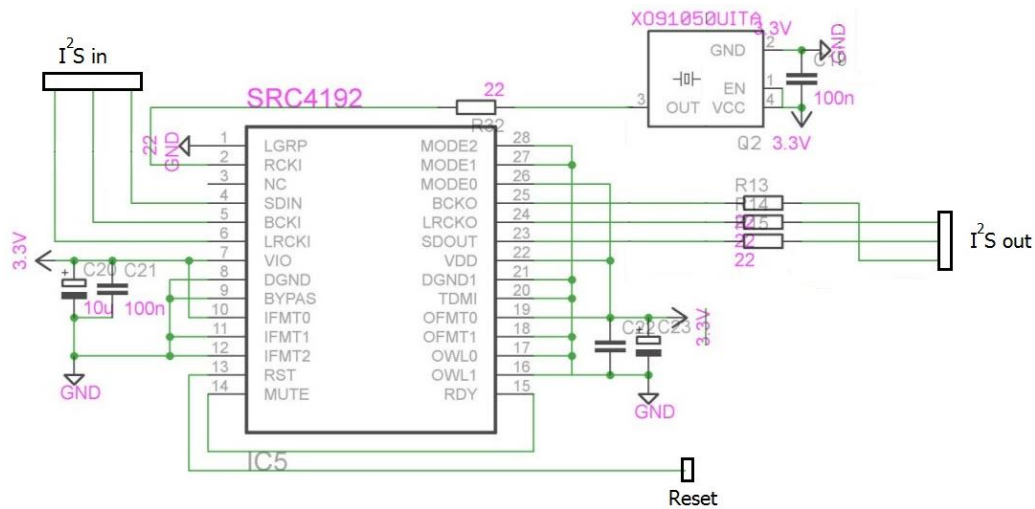
sisäiseen käyttöön tarkoitettu RSV-nasta (nasta 19) kytketään yhteiseen digitaalipuolen maatasoon.[8.]

2.2.6 Näytteenottopiiri

SRC4192 on niin sanottu ASRC-piiri (Asynchronous Sample Rate Converter), eli asynkroninen näytteenottopiiri. Se tukee näytteenottotaajuuksia 212 kHz:n saakka, kunhan sisään ja ulostuleva näytteenottotaajuus on suhteessa 16:1 - 1:16. Eli piiri voi muuntaa sisään tulevan signaalin näytteenottotaajuuden ylemmäs (*upsampling*) tai alemmassa (*downsampling*). Tässä tapauksessa piiriä käytetään nostamaan dekooderilta tuleva sisääntulosta riippuvainen näytteenottotaajuus vakioon 192 kHz:n.

Laite olisi toiminut ilman näytteenottopiiriäkin, mutta sen vaikutusta äänenlaatuun haluttiin kokeilla. Piirin luvataan pienentävän näytteistykseen sekä ulkoisen oskillaattorin *jitteriä*. Näytteenottopiiristä löytyy BYPASS-nasta (nasta 9), jonka kytkemällä loogiseen ykköseen, saadaan signaali vietyä piirin läpi ilman, että näytteenottotaajuuteen tehdään muutoksia.

Näytteenottopiiri tarvitsee ulkoisen kellopulssin RCKI-nastaan (nasta 2). Kellopulssi olisi voitu ottaa suoraan dekooderipiiriltä (nasta 4), mutta tässä työssä haluttiin käyttää erillistä 24,576 MHz:n oskillaattoria (kuva 8). Ulkoista oskillaattoria käyttäen saavutetaan sisään tulevasta signaalista riippumaton sisäinen kello sekä erillisen oskillaattorin oletetaan olevan tarkempi. 24,576 MHz:n kellopulssi tuotetaan Euroquartsin XO91050UITA -oskillaattorilla. Oskillaattori on jänniteohjattu, joten se vaatii toimiakseen 3,3 V:n jännitteen [9]. Oskillaattori pyrittiin sijoittamaan mahdollisimman lähelle näytteenottopiiriä, mutta myös D/A-muunninta, jotta kellopulssi vääristyisi mahdollisimman vähän.



Kuva 8. Näytteenottopiirin kytkentäkaavio

Piiri tarvitsee myös samanlaisen *reset*-signaalin, kuin dekooderi. *Reset*-signaali otetaan samalta MCP100T-*reset*-piiriltä ja viedään näytteenottopiiriin RST-nastaan (nasta 13).

Näytteenottopiiriin toimintamuoto asetetaan käyttäen MODE2 (nasta 28), MODE1 (nasta 27) ja MODE0 (nasta 26) -nastoja. Taulukossa 3 esitetään vaihtoehtoja, miten piiri voidaan kytketä toimimaan.

Taulukko 3. Näytteenottopiiriin toimintamuodot [10, s. 18]

MODE2	MODE1	MODE0	SERIAL PORT MODE
0	0	0	Both Input and Output Ports are Slave mode
0	0	1	Output Port is Master mode with RCKI = 128f _S
0	1	0	Output Port is Master mode with RCKI = 512f _S
0	1	1	Output Port is Master mode with RCKI = 256f _S
1	0	0	Both Input and Output Ports are Slave Mode
1	0	1	Input Port is Master mode with RCKI = 128f _S
1	1	0	Input Port is Master mode with RCKI = 512f _S
1	1	1	Input Port is Master mode with RCKI = 256f _S

Piiriin ulostulo asetetaan *master*-tilaan, jolloin näytteenottopiiri kellottaa ulostulevan signaalin ulkoisella 25,576 MHz:n kellolla. Koska referenssikello (RCKI) on 25,576 MHz ja ulostulevaksi näytteenottotaajuudeksi halutaan 192 kHz, valitaan taulukosta 3 kertomeksi 128.

$$\text{Siis } RCKI = 128f_s = 128 * 192 \text{ kHz} = 25,576 \text{ MHz}$$

Näytteenottopiiri tukee kolmea erilaista sisääntuloformaattia. Sisääntuloformaatti voidaan valita taulukon 4 mukaan:

Taulukko 4. Sisääntuloformaatin valintataulukko [10, s. 19]

IFMT2	IFMT1	IFMT0	INPUT PORT DATA FORMAT
0	0	0	24-Bit Left Justified
0	0	1	24-Bit I2S
0	1	0	Unused
0	1	1	Unused
1	0	0	16-Bit Right Justified
1	0	1	18-Bit Right Justified
1	1	0	20-Bit Right Justified
1	1	1	24-Bit Right Justified

Koska työssä käytetään I²S-muotoa, valitaan listasta 24 bittinen I²S ja asetetaan IFMT2 (nasta 12), IFMT1 (nasta 11) ja IFMT0 (nasta 10) -nastat taulukon osoittamiin tiloihin. Sisään tuleva signaali (Dekooderin ulostulo: LRCKO, BCKO ja DOUT) menee näytteenottopiirin vastaaviin sisääntulonastoihin (LRCKI, BCKI ja SDIN).

Näytteenottopiiristä saadaan signaali ulos neljällä eri formaatilla. Taulukossa 5 esitetään miten nastoilla OFMT1 (nasta 18) ja OFMT0 (nasta 18) määritetään signaalin ulostuloformaatti, sekä miten nastoilla OWL1 (nasta 16) ja OWL0 (nasta 15) määritetään signaalin tarkkuus.

Taulukko 5. Ulostulotuloformaatin valintataulukko [10, s. 20]

OFMT1	OFMT0	OUTPUT PORT DATA FORMAT
0	0	Left Justified
0	1	I ² S
1	0	TDM
1	1	Right Justified
OWL1	OWL0	OUTPUT PORT DATA WORD LENGTH
0	0	24-Bits
0	1	20-Bits
1	0	18-Bits
1	1	16-Bits

Määritetään valintanastat niin, että saadaan piirin ulostulosta 24 bittinen I²S-muotoinen signaali.

Näytteenottopiirissä on *soft mute* -funktio, jolla ulostulo saadaan vaimennettua hiljaiseksi askelittain. Sitä ei tässä tapauksessa tarvita, joten MUTE-nasta (nasta 14) kytketään RDY-nastaan (nasta 15). Näin kytkettynä näytteenottopiiri hiljentää ulostulon, jos se ei havaitse sisään ja ulostulon näytteenottotaajuuden suhteessa muutosta.

LGRP-nastalla (nasta 1) määritetään niin sanottu *low group delay*. Se määrittää kuinka monta ääniäytettä näytteenottopiiri varastoi, ennen kuin se alkaa prosessoida dataa. Vaihtoehtoina on joko normaali viive (64 näytettä) tai matala viive (32 näytettä). Tässä työssä LGRP-nasta asetettiin maatasoon, jolloin käyttöön tulee normaali viive.

Näytteenottopiirin 3,3 V:n käyttöjännite (V_{IO} ja V_{DD} , nastat 7 ja 22) suodatetaan lähelle piirin nastoja asennettavilla 10 μ F:n Elna Silmic II -kondensaattoreilla, sekä 100 nF:n keraamisilla kondensaattoreilla.[10.]

2.2.7 D/A-muunnin

Itse D/A-muunnoksen tekee Texas Instrumentin PCM1794a-piiri. Se tukee 16 ja 24 bitin tarkkuutta sekä 10 - 200 kHz:n näytteenottotaajuutta. Piirissä on 8-kertaa ylinäytteistävä digitaalinen suodatus, jonka jyrkkyyden voi valita terävän ja hitaan väliltä. Ulostulevalle signaalille luvataan 0,0015 %:n kokonaisharmoninen särö sekä 127 dB:n signaali-kohinasuhde 2 V:n ulostulojännitteellä, kun näytteenottotaajuus on 192 kHz.

D/A-muunnin tarvitsee ulkoisen kellopulssin digitaaliseen interpolointisuotimeen sekä itse D/A-muunnoksen modulaattoreille. Kellopulssina käytetään näytteenottopiirikin käyttämää 24,576 MHz:n kelloa. Kellopulssi syötetään 22 Ω :n virranrajoitusvastuksen kautta SCK-nastaan (nasta 7). D/A-muuntimessa on sisäänrakennettuna kytkentä, joka tunnistaa D/A-muuntimeen syötetyn kellon taajuuden.

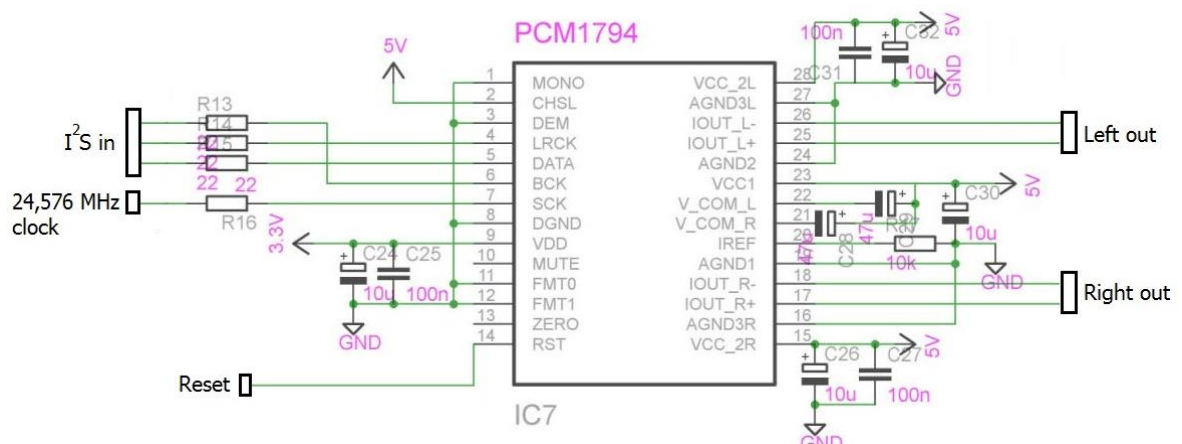
D/A-muunnin tarvitsee *reset*-jakson, samalla lailla kuin dekooderi ja näytteenottopiiri tarvitsivat. Piirissä on sisään rakennettuna käynnistykseen yhteydessä tapahtuva resetointi. Jotta resetointi tapahtuisi samaan aikaan muiden piirien kanssa, on hyvä käyttää samaa reset-signaalia. *Reset*-jakso otetaan ulkoiselta *reset*-piiriltä ja viedään D/A-muuntimen RST-nastaan (nasta 14).

Sisään tuleva signaali tuodaan näytteenottopiiriltä LRCK (nasta 4), DATA (nasta 5) ja BCK (nasta 7) -nastoihin (kuva 9). Signaaleissa on jokaisessa 22 Ω :n virranrajoitusvastus. Sisään tulevan signaalin formaatti ja käytettävän digitaalisen suodattimen muoto valitaan taulukon 6 mukaan:

Taulukko 6: Sisääntuloformaatin ja suodattimen muodon valintataulukko [11, s.17]

MONO	CHSL	FMT1	FMT0	FORMAT	STEREO/MONO	DF ROLLOFF
0	0	0	0	I ² S	Stereo	Sharp
0	0	0	1	Left-justified format	Stereo	Sharp
0	0	1	0	Standard, 16-bit	Stereo	Sharp
0	0	1	1	Standard, 24-bit	Stereo	Sharp
0	1	0	0	I ² S	Stereo	Slow
0	1	0	1	Left-justified format	Stereo	Slow
0	1	1	0	Standard, 16-bit	Stereo	Slow
0	1	1	1	Digital filter bypass	Mono	–
1	0	0	0	I ² S	Mono, L-channel	Sharp
1	0	0	1	Left-justified format	Mono, L-channel	Sharp
1	0	1	0	Standard, 16-bit	Mono, L-channel	Sharp
1	0	1	1	Standard, 24-bit	Mono, L-channel	Sharp
1	1	0	0	I ² S	Mono, R-channel	Sharp
1	1	0	1	Left-justified format	Mono, R-channel	Sharp
1	1	1	0	Standard, 16-bit	Mono, R-channel	Sharp
1	1	1	1	Standard, 24-bit	Mono, R-channel	Sharp

Valitaan taulukosta MONO (nasta 1), CHSEL (nasta 2), FMT1 (nasta 12) ja FMT0 (nasta 11) -nastojen arvot niin, että sisääntuloformaattiksi tulee stereo I²S sekä suotimen jyrkyydeksi tulee hidas. Hitaalla jyrkkyydellä saavutetaan parempi äänenlaatu, koska signaalin tulee vähemmän ajan vääristymiä [12].



Kuva 9. D/A-muuntimen kytkentäkaavio

D/A-muuntimen digitaalipuolen 3,3 V:n (V_{DD} , nasta 9) sekä analogipuolen 5 V:n (V_{CC-2L} , V_{CC1} ja V_{CC-2R} , Nastat 28, 23 ja 15) käyttöjännitteet suodatetaan lähelle piirin nastoja asennettavilla 10 μ F:n Elna Silmic II -kondensaattoreilla, sekä 100 nF:n keraamisilla kondensaattoreilla. Digitaali- (DGND, nasta 8) ja analogiamaat (AGND:t, nastat 27, 24, 19 ja 16) pidetään erillään ja maat yhdistetään vasta käyttöjännitteiden tuloliittimellä.

D/A-muuntimen *bias*-piiri tarvitsee 47 μ F:n suodatuskondensaattorit V_{COML} ja V_{COMR} -nastoista (nastat 22 ja 21) 5 V:n käyttöjännitteeseen. Sekä 10 k Ω :n vastuksen IREF (nasta 10) -nastasta analogiseen maatasoon.

Analoginen balansoitu stereosignaali saadaan ulos nastoista I_{OUTL-} ja I_{OUTL+} (nastat 26 ja 25) sekä I_{OUTR-} ja I_{OUTR+} (nastat 18 ja 17). Balansoitu signaali viedään I/V-muunnospiiriin. [11.]

2.2.8 I/V-muunnin ja alipäästösuodattimet

Koska D/A-muuntimessa on virtalähtöinen ulostulo, täytyy virta muuttaa jännitteeksi. I/V -muunnokseen käytettiin D/A-muuntimen datalehdeltä löytyvää esimerkkikytkentää (kuva 10). Ainoana erona oli NE5534-operaatiovahvistimen korvaaminen virtajännitemuunnoksessa uudemmalla OPA2107-operaatiovahvistimella, sekä balansoidun signaalin muuttamisessa balansoimattomaksi käytetyn LT1028-operaatiovahvistimen korvaaminen OPA1611-operaatiovahvistimella. OPA2107-operaatiovahvistimen etuna on pienempi särö sekä nopeampi nousunopeus ja OPA1611-operaatiovahvistimen etuna on sen pienempi särö ja kohina.

Operaatiovahvistimien käyttöjännitteet suodatetaan lähelle piirin nastoja asennettavilla 47 μ F:n Elna Silmic II -kondensaattoreilla, sekä 100 nF:n keraamisilla kondensaattoreilla. Kytkentäkaaviossa (kuva 10) olevat maat yhdistetään kaikki samaan analogiamahaan.

Virta - jännitemuunnoksen sekä yli 96 kHz:n taajuuksien suodatuksen jälkeen signaali suodatetaan toisen kerran aktiivisesti sekä muutetaan balansoidusta signaalista balansimattomaksi signaaliksi.

Toisen alipäästösuodattimen rajataajuudeksi saadaan kaavalla 4

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi * 270 \Omega * 2700 pF} = 218319,5 \text{ Hz} \approx 22 \text{ kHz}$$

Ulostulojännite määräytyy OPA1611-operaatiovahvistimen jännitevahvistuksesta G , joka voidaan laskea vastuksien $R20$ ja $R19$ (kuva 10) suhteesta.

Jännitevahvistus on

$$G = \frac{270 \Omega}{560 \Omega} = 0,48,$$

joten ulostulojännite on

$$U_{out} = G * U_{out1} = 0,48 * 5,85 V_{pk-pk} = 2,8 V_{pk-pk}.$$

D/A-muuntimen ulostulosta pitäisi tulla ulos kaikki alle 22 kHz:n taajuudet vaimentumatta $2,8 V_{pk-pk}$ jännitteellä. [11.]

2.3 Piirilevy

Piirilevyt ja kytkentäkaaviot suunniteltiin CadSoft'in Eagle-ohjelmalla. Eaglea käytettiin sen helppouden, laajan komponenttikirjaston ja laajennettavuuden takia. Erikoisimmat piirit kuten esimerkiksi D/A-muunnin jouduttiin piirtämään itse, koska niitä ei löytynyt Eaglen omasta komponenttikirjastosta.

D/A-muuntimen piirilevysuunnittelussa pyrittiin pitämään kiinni seuraavista perusasioista:

- mahdollisimman lyhyet vedot
- vetojen käännökset 45 asteen kulmilla

- levyn yläpuolella yhtenäinen maataso
- analogia- ja digitaalimaa erillään (yhdistetään yhdessä pisteessä)
- IC-piirien suotonkondensaattorit mahdollisimman lähellä IC:n jalkoja
- paluuvirroilla mahdollisimman hyvä reitti maatasoon
- kytkimen ja liittimen järkevä sijoittelu
- komponenttien tasapainoinen sijoittelu piirilevyllä.

D/A-muuntimen piirilevykuvat (*bottom* ja *top*) esitetään liitteessä 4.

Jännitelähteen piirilevy ei ole niin kriittinen suunnittelulle, koska siellä kulkee vain pieni-taajuista vaihtojännitettä pienellä jännitteellä sekä matalatasoista tasajännitettä. Piirilevyn suunnittelussa pyrittiin pitämään maataso mahdollisimman isona sekä lähellä jännitteisiä vetoja, koska sillä saavutetaan mahdollisimman iso kapasitanssi jännitteisen vedon ja maatason välillä.

Pintaliitosregulaattoreiden sijoittelussa tuli ottaa huomioon niiden jäähditys. Regulaattoreiden jäähditys on suunniteltu niin, että ylimääräinen lämpöenergia siirtyisi piirilevyn kuparia pitkin pois. Tästä syystä kuparialue regulaattoreiden alla jätettiin mahdollisimman isoksi. TO220-kotelolla olevat regulaattorit pyrittiin sijoittamaan niin, että ne on mahdollista kiinnittää kotelon pohjalevyyn. (Ks. liite 3, Jännitelähteen piirilevykuva)

Piirilevyn jyrsimistä varten tarvitaan *gerber*-tiedostot. Eaglesta ei saada suoraan *gerber*-tiedostoja tallennettua, vaan joudutaan käyttämään Eeagleen sisäänrakennettua pientä CAM-ohjelmaa. CAM-ohjelmalla luodaan ensin *poratiedostot*, jotka sisältävät poraukseen tarvittavat tiedot. Tämän jälkeen luodaan piirilevyn yläpuoli (*top*) sekä juotospuoli (*bottom*).

Piirilevyt jyrtsittiin ProtoMat-piirilevyjyrsimellä. Jyrsimen CAM-ohjelmistona käytettiin CircuitCamia, joka hyväksyy muun muassa *gerber*-tiedostoja. CircuitCam-ohjelmalla yhdistetään eri piirilevykerrokset ja poraustiedot, valitaan käytettävät jyrksinterät, määritetään, mitkä kuparialueet jyrsitään pois, sekä mistä kohdasta piirilevy jyrsitään irti piirilevyvaihiosta.

CircuitCam-ohjelmasta saatu tiedosto siirretään itse jysintäohjelmaan, Boardmasteriin. Boardmaster laskee jysimen liikeradat ja käskää käyttäjää vaihtamaan tarvittavat jysinterät.

3 D/A-muuntimen kotelo

3.1 Kotelon suunnittelu

Koteloä lähdettiin suunnittelemaan siltä pohjalta, mitä odotuksia kotelon tulee täyttää. Suunnittelunprosessin aikana saatiin seuraavaa lista asioista, jotka tulee ottaa huomioon:

- sähköturvallisuus
- käytettävyys
- ulkonäkö
- valmistuksen helppous
- hinta
- materiaalit (saatavuus)
- jäähdytys.

Eniten huomiota kiinnitettiin sähköturvallisuuteen, koska laitteeseen sisälle tulee verkkojännite ja kotelo on suurimmaksi osaksi metallia. Kaikki verkkojännitteiset osat eristetään hyvin, paljaat liitoskohdat peitetään kutistesukalla, ja muuntaja irrotetaan kotelon rungosta kumieristeellä. Kaikki kotelon ulkoapäin kosketeltavat metalliset osat maadoitetaan suojamaahan. Suojamaajohdin kiinnitetään ensin rengasliittimeen, jonka jälkeen rengasliittimen ja kotelon metallisen osan välille tulee tähti-aluslevy. Tähti-aluslevyn tarkoitus on pureutua metalliseen osaan ja varmistaa kunnollinen sähkönjohtavuus. Eri metalliosista tulevat suojamaajohtimet kytketään samaan pisteeseen ja tästä pisteestä lähtee yksi johdin IEC C16 -liittimen suojamaahan. Suojamaajohtimena käytetään kelta-vihreää 1,5 mm²:n johtoa.

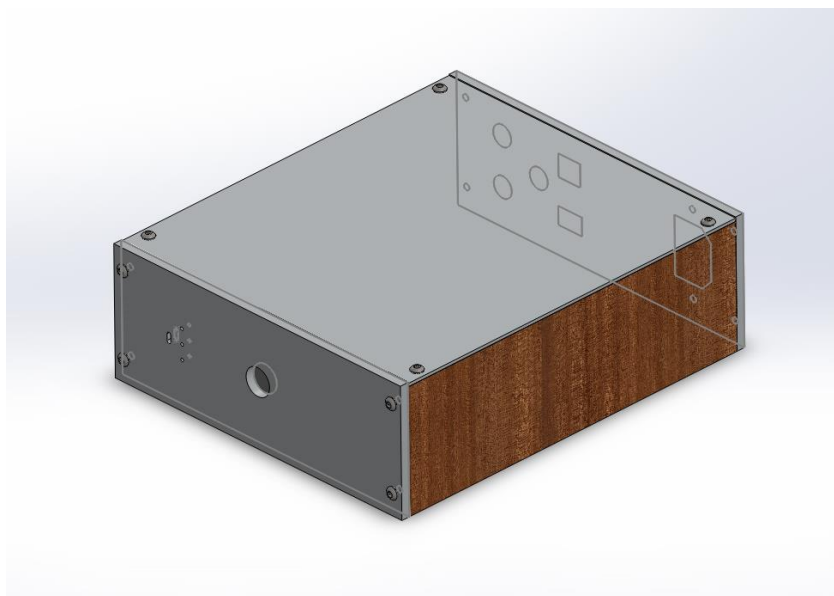
Kotelon ulkonäkö ratkaisi käytännössä kaikki materiaalivalinnat, sillä laitteen tuli olla samaa tyyliä kuin aikaisemmin rakennetut audiolaitteet. Tästä syystä etu- ja takalevyt sekä pohja ja katto olisivat alumiinia ja sivut puuta. Kotelon ulkoiset mitat määräytyivät sisälle tulevien piirilevyjen ja muuntajan koon mukaan.

Jäähdytyksen osalta oli myös järkevää valita suuret alumiiniset kappaleet, koska ylimääräinen hukkaenergia saadaan regulaattoreilta siirrettyä näihin kappaleisiin. Tässä

säästetään rahaa, sillä ei tarvitse hankkia erikseen jäähdytysprofiileja, mutta myös kotelon koko pysyy pienempänä.

Etulevyyn sijoitetaan käyttäjän tarvitsemat virtakytkin ja sisääntulonvalitsin, jotta niiden käyttäminen olisi mahdollisimman vaivatonta. Myös sisääntulon merkkivalot sijoitetaan etulevyyn helpottamaan käyttäjää.

Kotelosta piirrettiin 3D-malli (kuva 11) SolidWorks 3D-CAD -suunnitteluohjelmistolla:

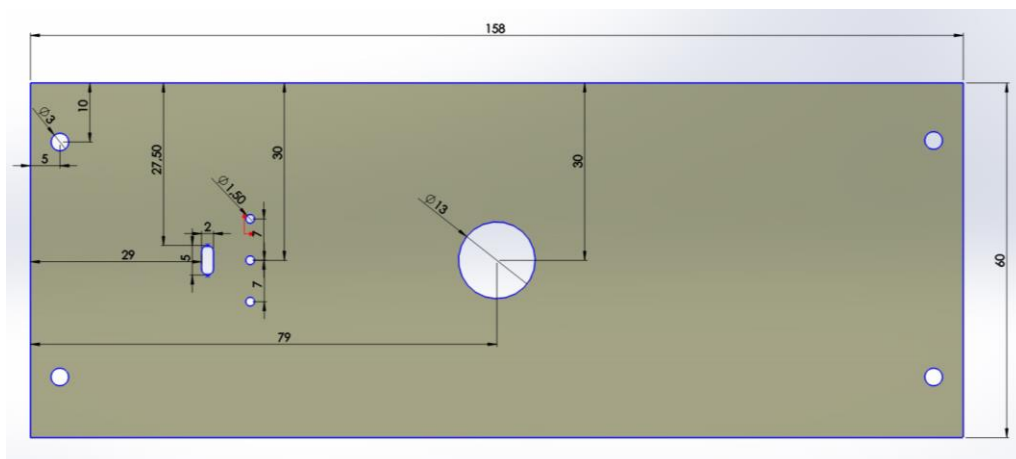


Kuva 11. Kotelon 3D-malli

3.2 Kotelon toteutus

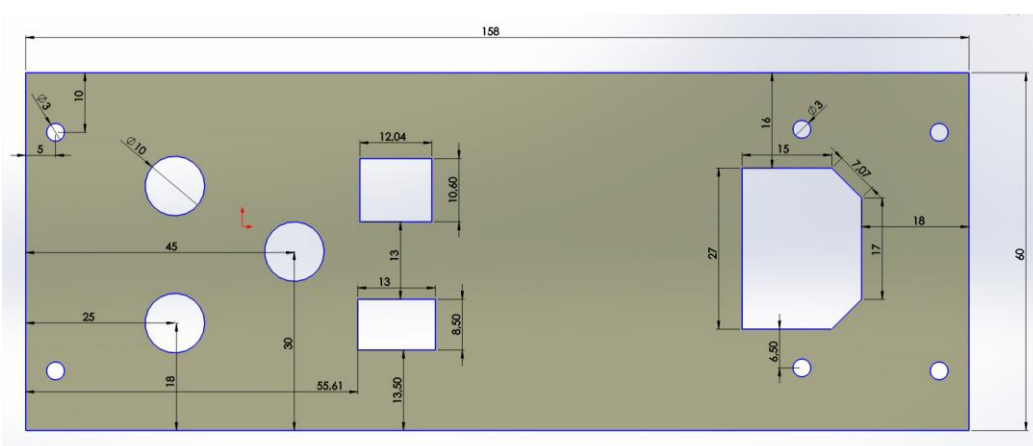
Kun kotelon mitat olivat selvillä, voitiin kotelon valmistaminen aloittaa. Materiaaleina käytettiin etu- ja takapaneeleissa eloksoitua 5 mm x 60 mm alumiinilattatankoa, kannessa ja pohjassa 2 mm alumiinilevyä sekä sivuissa 16 mm:n mahonkista liimalevyä.

Kotelon etupaneeliin koneistettiin tarvittavat aukot kiinnitysruuveille, kytkimille sekä ledeille kuvan 12 mukaan. Kuvassa mitat ovat millimetreinä.



Kuva 12. Etulevyn mitoitus

Kotelon takalevylle koneistettiin liittimen tarvitsemat reiät kuvan 13 mukaan.



Kuva 13. Takalevyn mitoitus

Koska etulevystä haluttiin saada mahdollisimman hillitty ja pelkistetty, siihen ei haluttu ylimääräisiä kiinnitysmuttereita kytkimelle tai ledkauluksia ledeille.

Sisääntulon merkkivalolle porattiin vain 1,5 mm:n reiät etulevyyn, josta ledien valo pääsee läpi. Etulevyn takapuolelle jyrsittiin 3 mm:n syvennykset, joihin ledit liimattiin kiinni.

Valintakytkimelle käytettiin samanlaista tekniikkaa kuin ledeille. Kytkimen 6 mm runko-osalle jyrsittiin syvennys etulevyn sisäpuolelle sekä kytkimen vivulle jyrsittiin kytkimen liikkumissuunnassa 5 mm:n pitkä ja 2 mm:n leveä ura.

Kun etu ja takalevyyn oli koneistettu tarvittavat reiät, kiinnitettiin levyt ruuveilla mahonkiliimalevystä leikattuihin sivuihin. Sivujen kiinnitysten jälkeen kiinnitettiin ruuveilla alumiinilevystä leikatut katto ja pohja paikalleen.

Tasaisen pinnan saavuttamiseksi katon, sivujen ja päätyjen välillä, kiinnitettiin tasaiselle alustalle hiomapaperia, jota vasten kotelon sivut hiottiin.

Tarvittavan hiomisen jälkeen kotelo purettiin ja kotelon käsittelemättömät pinnat käsiteltiin. Puset sivut öljyttiin Danish Oililla ja alumiinilevyt lakattiin spraylakalla.

Kotelon valmistuttua kiinnitettiin kotelon etulevyyn ledit ja kytkimet, takalevyyn liittimet, sekä kotelon sisälle piirilevyt ja muuntaja.

Kuvassa 14 esitellään valmistunut kotelo etupuolelta:



Kuva 14. Valmis D/A-muunnin

4 Mittaustulokset

4.1 Jännitelähteen mitta

Ensimmäisellä mittauskerralla mitattiin ulostulojännitteet Fluken 75 III -yleismittarilla ja säädettiin säädettävät regulaattorit oikeisiin arvoihin. Mittaustulokset esitetään taulukossa 7:

Taulukko 7. Jännitteiden mittaustulokset

Regulaattori	Jännite (V)
LM317	15,00 V
LM337	-15,00 V
TLV1117	5,50 V
TPS79633	3,32 V
TPS79650	5,02 V

Seuraavaksi kuormitettiin jännitelähdettä taulukossa 1 (ks. s 3) näkyvillä maksimivirrankulutuksilla. Kuormitusvastukset laskettiin ohmin lain avulla.

Ohmin lailla saadaan 5 V:n kuormavastukseksi

$$R_{5V} = \frac{U}{I} = \frac{5 \text{ V}}{133 \text{ mA}} = 37,6 \Omega,$$

3,3 V:lle

$$R_{3,3V} = \frac{U}{I} = \frac{3,3 \text{ V}}{215 \text{ mA}} = 15,3 \Omega$$

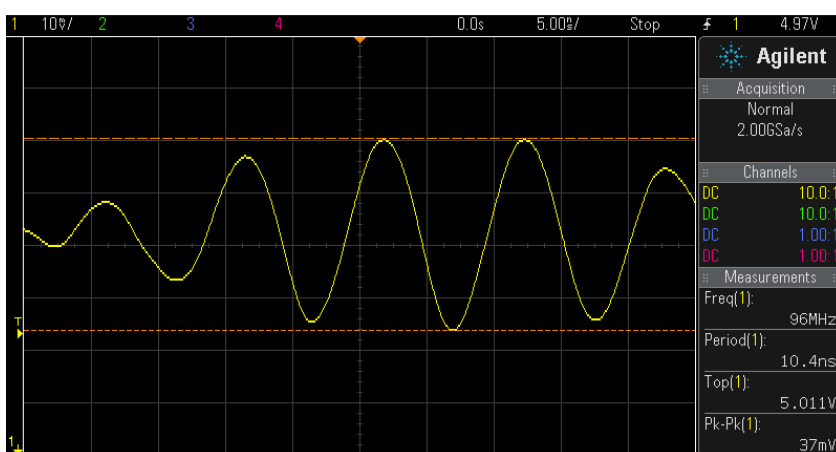
ja 15 V:lle

$$R_{15V} = \frac{U}{I} = \frac{15 \text{ V}}{60 \text{ mA}} = 250 \Omega.$$

Vastukset valittiin seuraavaan pienempään arvoon, jolloin virrankulutus tulee todellista arvoa vähän suuremmaksi. Vastusten tehonkestoksi valittiin 5 W.

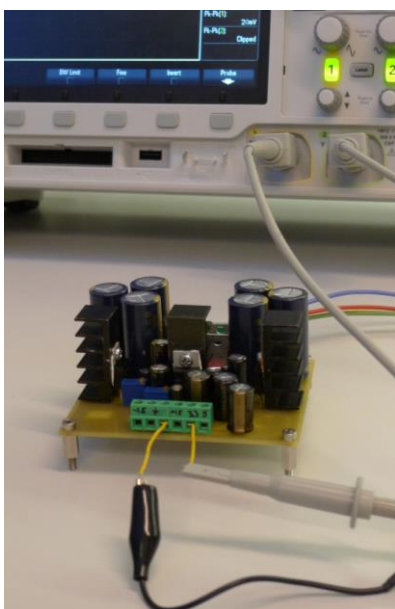
Ulostulojännitteitä mitattiin Agilent DSOX2014A -oskilloskoopilla ja regulaattoreiden käyntilämpötilaa yleismittariin kiinnitetyllä lämpötila-anturilla.

Ensimmäisellä kerralla *ripple*-jännitettä mitattaessa, jännitelähteen ulostuloissa näkyi noin 40 mV:n *ripple*-jännite, joka värähteli 96 MHz:n taajuudella (kuva 15).



Kuva 15. 5 V:n jännitelinjan ripple-jännite.

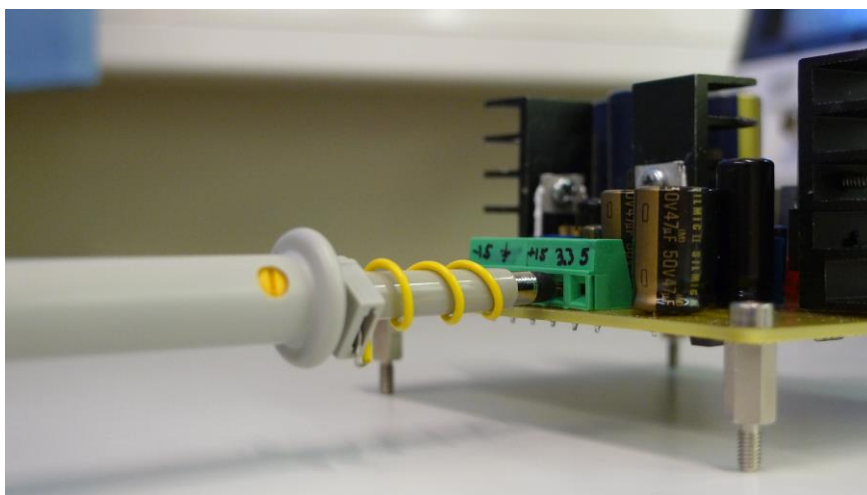
Jännite mitattiin oskilloskoopin omalla mittapäällä jännitelähteen riviliittimestä (kuva 16).



Kuva 16. *Ripple*-jännitteen mittaaminen

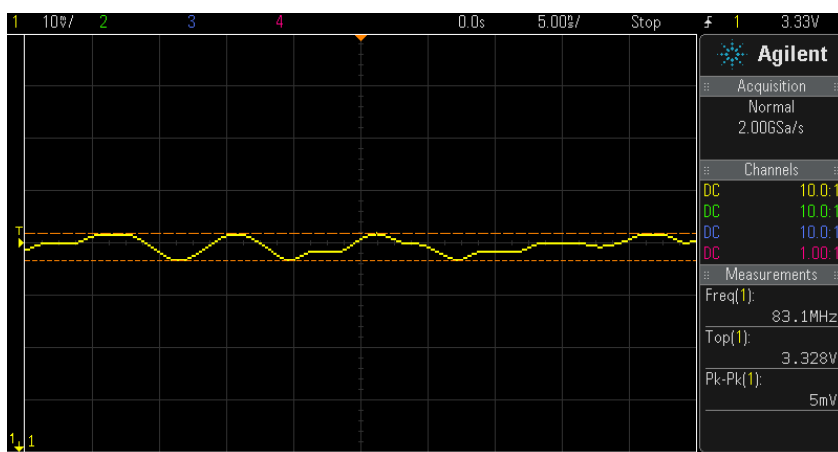
TI E2E Support Communityn artikkelista selvisi, että *ripple*-jännitteen mittaaminen oikeaoppisesti pitää tehdä niin, että mittausjohtimen maa-jodin on mahdollisimman lyhyt ja mittaus suoritetaan suoraan regulaattorin ulostulokondensaattorin yli. Tällä tavalla minimoidaan häiriöiden kytkeytyminen pitkiin suojaamattomiin johtimiin. [13.]

Oskilloskoopin mittajohtimesta poistettiin sen oma maa-johdin, ja se korvattiin palalla kytkentälankaa. Tämän jälkeen jännite mitattiin uudestaan riviliittimestä (kuva 17).



Kuva 17. *Ripple*-jännitteen mittaaminen modifioidulla mittapäällä

Kuvassa 17 esitetyllä mittaustavalla saatiin *ripple*-jännite putoamaan noin 5 mV:iin, joka on jo alle halutun 10 mV_{pk-pk} rajan (kuva 18).



Kuva 18. *Ripple*-jännite, 5mV

Ripple-jännitettä yritettiin vielä pienentää lisäämällä regulaattoreiden sisään- ja ulostuloihin $10\text{ }\mu\text{F}$:n keraamiset kondensaattorit. Tällä ei kuitenkaan ollut havaittavaa vaikutusta *ripple*-jännitteen suuruuteen.

Ripple-jännitemittauksia tehtäessä LM317-, LM337- ja TLV1117-regulaattorit oli kiinnitetty 1,5 cm x 3 cm kokoiisiin jäähdytyslevyihin. Nämä jäähdytyslevyt eivät pystyneet kunnolla haihduttamaan hukkatehoa, sillä 15 minuutin päällä olon aikana lämpötila vakiintui TLV1117-regulaattorissa noin 80 asteeseen ja LM317-regulaattorilla noin 70 asteeseen. LM337-regulaattori ei lämmennyt kuin muutaman asteen. TPS79633- ja TPS79650-regulaattorit lämpenivät noin 50 asteeseen.

Vaikka kaikista regulaattoreista löytyy lämpötilasuojaus, olisi lämpötilan hyvä olla mahdollisimman alhainen. Liian korkea käyntilämpötila vaikuttaa oleellisesti regulaattorien elinikään ja toimintavarmuuteen, mutta myös ympärillä oleviin komponentteihin, kuten elektrolyyttikondensaattoreihin.

Lämpötilamittaukset suoritettiin uudelleen, kun regulaattorit oli kiinnitetty kotelon runkoon ja jännitelähteen kuormana oli itse D/A-muunnin. LM317-regulaattorin lämpötila vakiintui noin 50 asteeseen, TLV1117-regulaattorin lämpötila noin 40 asteeseen.

4.2 D/A-muuntimen mittaukset

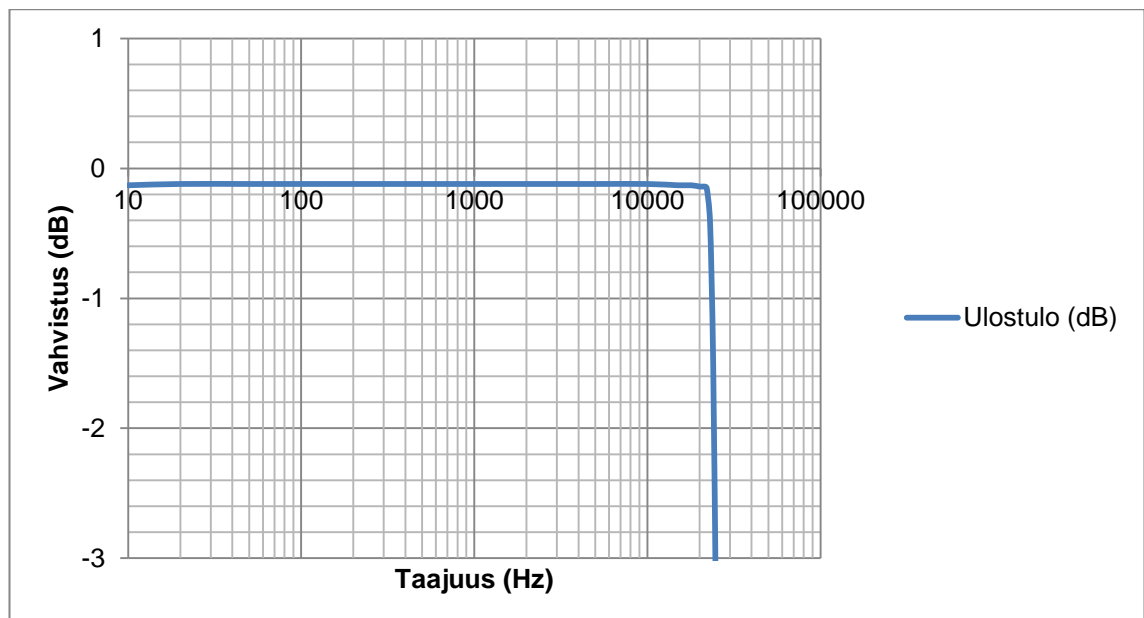
4.2.1 Taajuusvaste

Taajuusvasteella kuvataan systeemiin syötetyn signaalin voimakkuutta taajuuden funktiona. D/A-muunnin kytkettiin USB-kaapelilla tietokoneeseen ja TONE-signaaligeneraattorisovelluksella generoitiin siniaaltoja, alkaen taajuudesta 10 Hz aina 25 kHz:iin asti. D/A-muuntimen ulostulo mitattiin Agilent DSOX2014A -oskilloskoopilla FFT:tä (Fast Fourier transform) käyttäen. Mittaustulokset saatiin desibelivoltteina, jotka muutettiin vahvistukseksi. Tulokset esitetään taulukossa 8:

Taulukko 8. Taajuusvasteen mittaustulokset

Taajuus (Hz)	Vahvistus (dB)	Taajuus (Hz)	Vahvistus (dB)
10	-0,13	10000	-0,12
20	-0,12	15000	-0,13
50	-0,12	18000	-0,13
100	-0,12	20000	-0,14
200	-0,12	21000	-0,14
500	-0,12	22000	-0,15
1000	-0,12	23000	-0,41
2000	-0,12	24000	-1,52
5000	-0,12	25000	-3,72

Mittaustuloksista piirrettiin D/A-muuntimen taajuusvasteen kuvaaja (kuva 19).



Kuva 19. Taajuusvaste

Kuten kuvassa 19 on esitetty, taajuusvaste on tasainen 10 Hz:stä 22 kHz:iin, ja sen ylimenevät taajuudet alipäästösuodatin suodattaa pois.

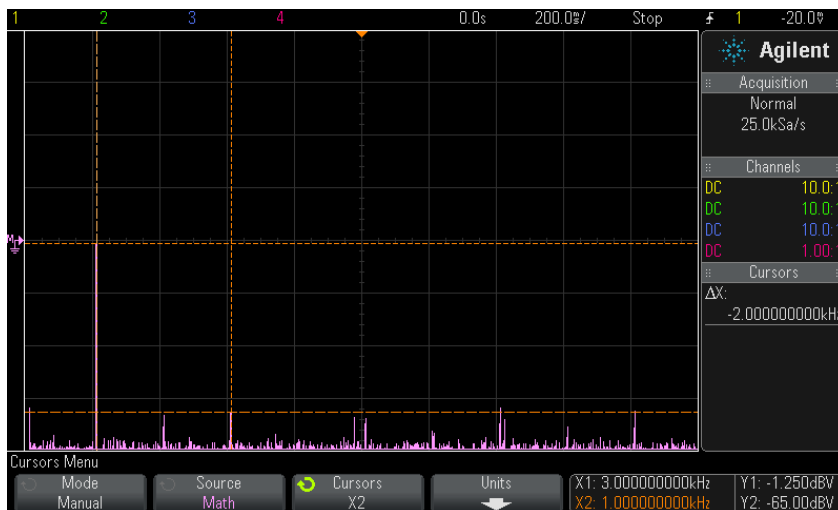
4.2.2 Kokonaisharmoninen särö ja kohina

D/A-muunnoksen epälineaarisuudesta johtuen signaaliin tulee taajuuksien monikertoja. Nämä monikerrat voivat aiheuttaa kuultavaa säröä signaaliin. THD + N (Total Harmonic Distortion + Noise) kuvaa tämän särön voimakkuutta. THD + N saadaan laskettua kaavan 5 mukaan

$$THD + N = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_{noise}^2}}{U_{out}} \quad (5)$$

jossa $U_1 \dots U_n$ on mittaussignaalin harmonisten särötaajuuksien jännitearvot, U_{noise} on kohinan taso ja U_{out} on mittaussignaalin taso.

D/A-muunnin kytkettiin USB-kaapelilla tietokoneeseen ja TONE-signaaligeneraattori-sovelluksella generoitiin 1 kHz:n siniaaltoja. Agilent DSOX2014A -oskilloskoopilla mitattiin FFT:tä käyttäen D/A-muuntimen ulostulosta 1 kHz:n mittasignaalin taso, harmonisten särökomponenttien tasot sekä kohinan ja muiden spektrissä näkyvien huippujen tasot. Kuvassa 20 on mittauksesta saatu spektri.



Kuva 20. 1 kHz:n mittasignaalin spektri

Mittaustulokset esitetään taulukossa 9.

Taulukko 9. THD+N:n mittaustulokset

Taajuus (f)	Jännite (dBV)	V _{out,RMS} (V)
10	-63,75	0,00065
1000	-1,25	0,866
2000	-66,25	0,00049
3000	-65	0,00056
4800	-66,875	0,00045
5000	-66,875	0,00045
6000	-63,75	0,00065
7000	-70,625	0,00029
8000	-64,375	0,0006
pohjakohina	-76,25	0,00015

Kaavalla 5 saadaan D/A-muuntimen THD+N laskettua taulukon 9 arvoista:

$$THD + N =$$

$$\frac{\sqrt{0,00065^2 + 0,00049^2 + 0,00056^2 + 0,00045^2 + 0,00045^2 + 0,00065^2 + 0,00029^2 + 0,0006^2 + 0,00015^2}}{0,866}$$

$$= 0,001739898 \% \approx 0,0017 \%$$

THD + N ilmoitetaan yleensä prosentteina, mutta myös desibeleinä. Prosentteina ilmaistuna THD + N on 0,0017 % ja desibeleinä -95,2.

Koska mittauksessa käytettiin USB-sisääntuloa, on saatu -95,2 dB:n tulos hyvällä tasolla. Jos mittaus olisi suoritettu käyttäen esimerkiksi koaksiaalista sisääntuloa, olisi arvo ollut luultavasti parempi. [14.]

4.2.3 Signaali-kohinasuhde

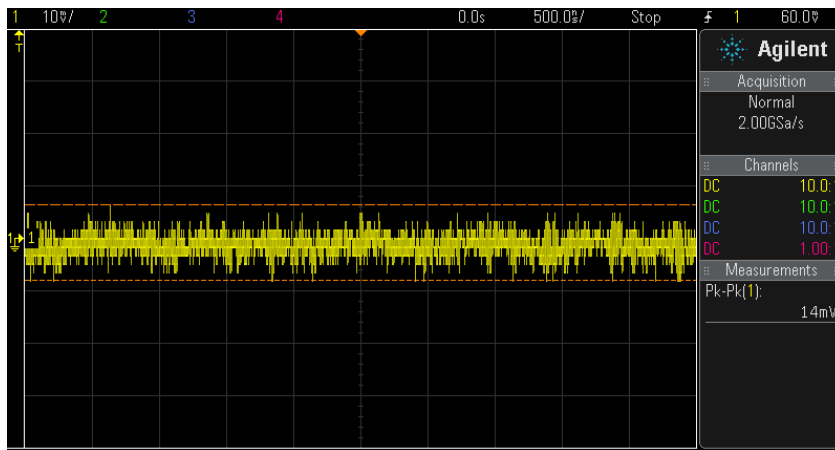
Signaali-kohinasuhde, eli SNR (Signal to Noise Ratio) tarkoittaa laitteen ulostulossa näkyvän hyötysignaalin ja laitteen itse tuottaman kohinan ja häiriösignaalien suhdetta. Sen merkitys audiolaitteissa on suuri, sillä kaikki ylimääräinen suhina tai hurina on häiritsevää kuulialle.

SNR saadaan laskettua kaavalla 6

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{out\ max}}{V_{noise}} \right), \quad (6)$$

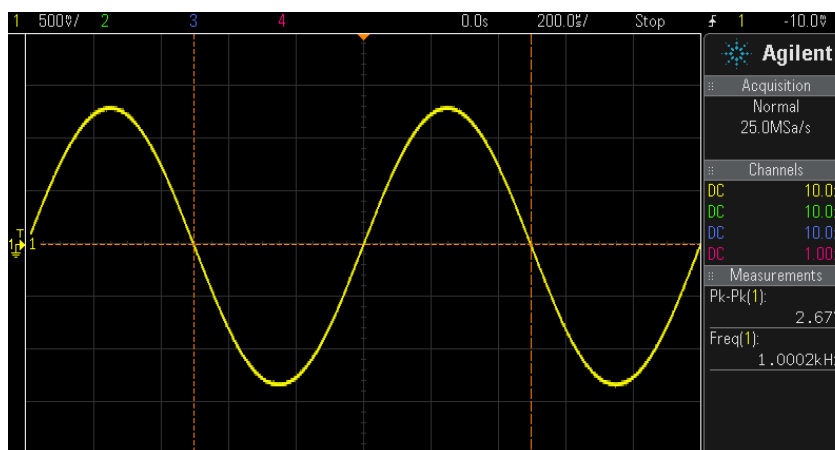
jossa $V_{out\ max}$ on hyötysignaalin jännite ja V_{noise} kohinan jännite.

Mittaus suoritettiin käyttämällä USB-sisääntuloa ja TONE-signaaligeneraattorisovellusta. Aluksi mitattiin Agilent DSOX2014A -oskilloskoopilla pelkästään D/A-muuntimen tuottama kohina, ilman mitään sisääntuloa. Kuvan 21 mukaan kohinan taso oli $14\ mV_{pk-pk}$.



Kuva 21. D/A-muuntimen kohina

Seuraavaksi tietokoneelta syötettiin 1 kHz:n siniaaltoja, ja mitattiin D/A-muuntimen ulostulojännite. Saatiin kuvan 22 mukainen 2,67 V_{pk-pk} jännite:

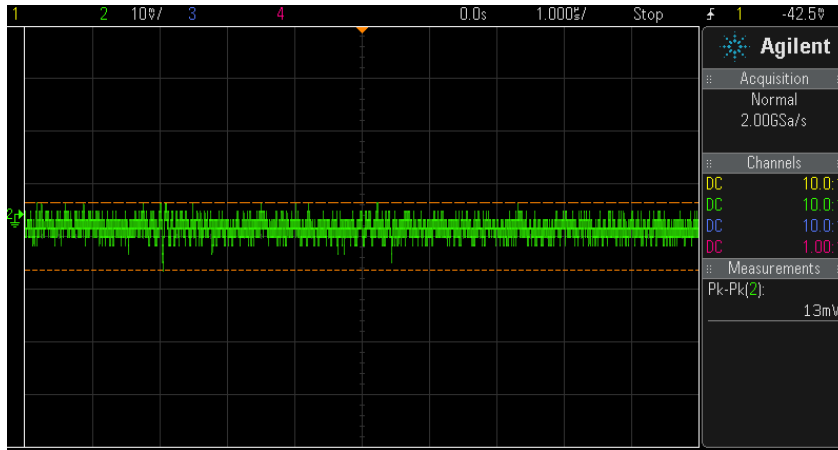


Kuva 22. D/A-muuntimen ulostulo, 1 kHz @ 2,67 V_{pk-pk}

Kaavalla 6 saadaan signaali-kohinasuhteeksi

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{0,944}{0,005} \right) = 45,45 \text{ dB} \approx 45,5 \text{ dB}.$$

Koska laskettu SNR ei vaikuttanut olevan täysin paikkaansa pitävä, alettiin ongelmaa tutkia tarkemmin. Ongelmaksi paljastui oskilloskoopin oma pohjakohina, joka ilman sisääntuloa oli kuvan 23 mukainen.



Kuva 23. Oskilloskoopin tuottama kohina

Oskilloskoopin oman pohjakohinan suuruus oli noin 13 mV_{pk-pk} ja mitattu D/A-muuntimen pohjakohina oli 14 mV_{pk-pk} . Kaavalla 7 saadaan laskettua kohinasignaalien summa

$$U_{noise} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}, \quad (7)$$

jossa U_{noise} on kokonaiskohina, U_1 on oskilloskoopin kohina ja U_2 on D/A-muuntimen kohina.

Kaavasta 7 ratkaistiin D/A-muuntimen kohina U_2

$$U_2 = \sqrt{U_{noise}^2 + U_1^2} = \sqrt{14^2 - 13^2} = 5,19 \text{ mV}_{pk-pk} \approx 5 \text{ mV}_{pk-pk}.$$

5 mV_{pk-pk} arvoa pohjakohinana käyttäen kaavalla 6 saatiin SNR:n arvoksi

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{0,944}{0,0017675} \right) = 54,55 \text{ dB} \approx 55 \text{ dB}.$$

Verrattuna kaupallisista laitteista mitattuihin arvoihin, saatu SNR arvo on kohtuullisen matala. Matalaan tulokseen vaikutti oleellisesti oskilloskoopin epätarkkuus ja sen oman pohjakohinan suuruus. [15.]

4.2.4 Ylikuuluminen

Ylikuulumisella tarkoitetaan ilmiötä, missä vasemman tai oikean kanavan signaali sotkeutuu toiseen kanavaan. Kytkeytyminen voi tapahtua todennäköisimmin kapasitiivisesti tai induktiivisesti, mutta virhetilanteessa myös johtumalla.

Mittauksessa käytettiin USB-sisääntuloa sekä TONE-signaaligeneraattorisovellusta. Tietokoneella syötettiin pelkästään oikeaan kanavaan tietyn taajuista sinimuotoista signaalia ja mitattiin vasemmasta kanavasta Agilent DSOX2014A -oskilloskoopilla FFT:tä käyttäen kyseisen taajuuden spektrin voimakkuus. Mittaukset suoritettiin 1 kHz:n, 10 kHz:n sekä 20 kHz:n taajuuksilla.

Mittauksissa vasemmassa kanavassa ei havaittu muutoksia millään taajuudella. Syyksi tähän epäiltiin oskilloskoopin tuottaman kohinan suuri voimakkuus, joka saattoi peittää alleen mitattavan signaalin.

5 Yhteenveto

Insinööriyössä tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa laite, joka muuntaa kolmesta erilaisesta lähteestä saatavan digitaalisen äänisignaalin analogiseksi hyvälaatuiseksi linjatasoiseksi signaaliksi.

Laitteen rakentaminen ei kuitenkaan sujunut ongelmitta. Ensimmäisen testauksen yhteydessä oikean kanavan ulostulossa näkyi 15 V:n tasajännite. Vika paikallistettiin viimeiseen analogia-asteeseen. Vika johtui ilmeisesti OPA1611-operaatiovahvistimen huonosta juotoksesta, sillä kun juotokset sulatettiin uudestaan, alkoi kyseinen kanava toimia.

USB ja optinen sisääntulo toimivat heti alkujaan ongelmitta, mutta koaksiaalinen sisääntulo ei. Kun koaksiaalinen sisääntulo kytkettiin päälle, näytteenottopiiri lakkasi toimimasta. Näytteenottopiiri hajosi niin, että 3,3 V:n jännitelinja oli oikosulussa maata-soa vasten piirin sisällä. Näytteenottopiiri sekä S/PDIF-TTL-vahvistimessa käytetty invertteri vaihdettiin. Tämän jälkeen koaksiaalinen sisääntulo alkoi toimia. Syytä näytteenottopiirin rikkoontumiseen ei löydetty, sillä jos S/PDIF-signaalivahvistin olisi antanut esimerkiksi liian ison ulostulojännitteen, olisi dekooderipiiri ensimmäisenä hajonnut.

D/A-muuntimen toiminnallisuutta olisi vielä voitu parantaa, mutta sitä ei ehditty tehdä rajallisen ajan takia. Laitteen kehittäminen jatkuu tämän työn jälkeenkin. Suunnitelmissa on muun muassa vielä lisätä PGA2313-piirillä toteutettu digitaalisesti ohjattu äänenvoimakkuudensäätö sekä kauko-ohjaus äänenvoimakkuudelle ja sisääntulon valinnalle.

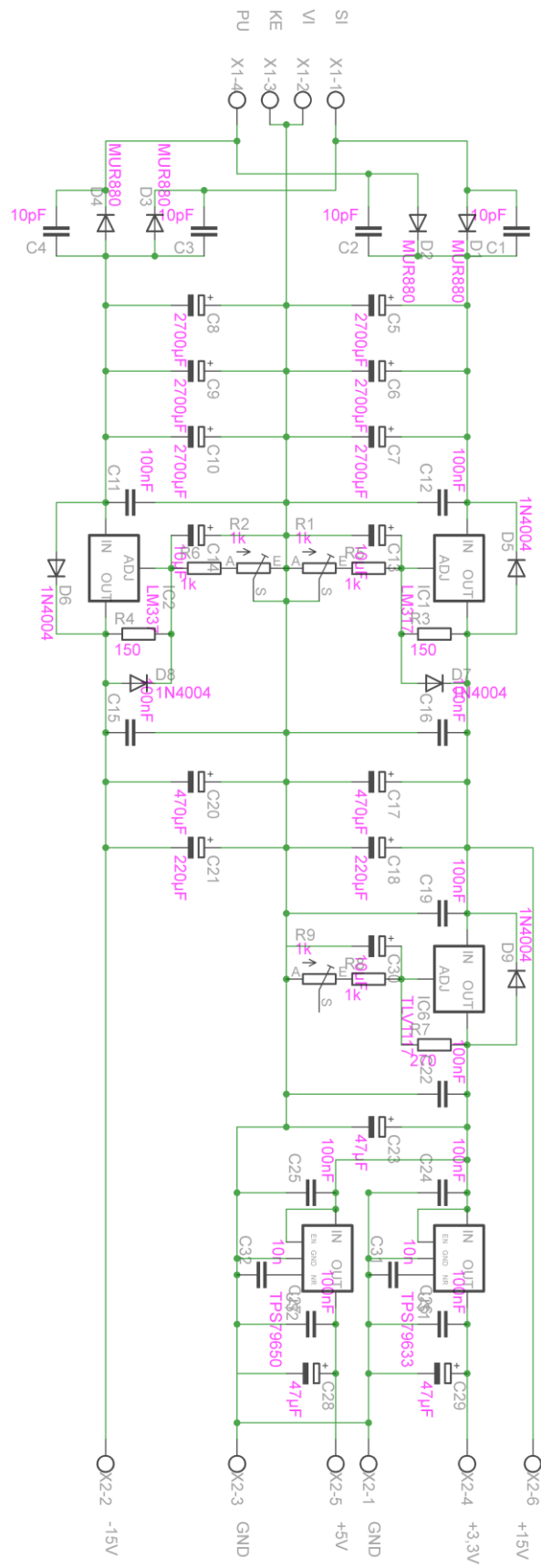
Työn lopputuloksena kuitenkin saatiin toteutettua suunniteltu laite, joka toimii kaikilla osa-alueilla hyvin. Laite kuulostaa hyvältä, sitä on helppo käyttää ja sen ulkonäkö miellyttää silmää. Mittaustuloksienkin perusteella voidaan sanoa, että kyseessä on hifi-laatuinen laite, vaikka SNR jäi odotettua pienemmäksi.

Lähteet

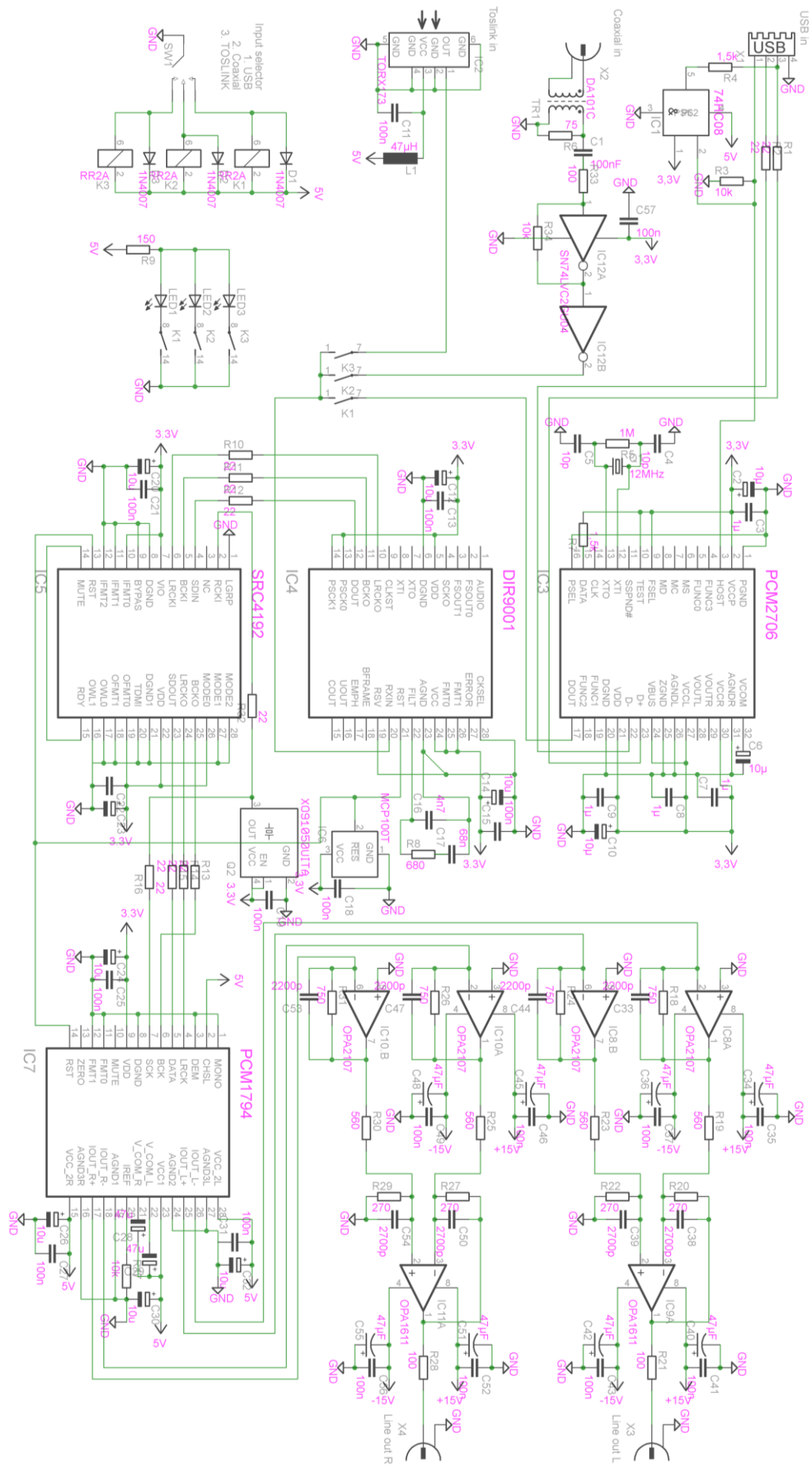
- 1 Eronen, Mauri. 2011. Tietoa ja taitoa: Mitä DA-muunnin tekee?. Hfimaailma 7/2011, s. 16 - 19.
- 2 SWITCHMODE Power Rectifiers, MUR880 thru MUR8100. 2006. Datalehti. <<http://www.cumsumi.com/pdf/4/MUR880-MUR8100.pdf>> Luettu 20.3.2012.
- 3 LM117/LM317A/LM317-N 3-Terminal Adjustable Regulator. 2011. Datalehti. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm117.pdf>> Luettu 20.3.2012.
- 4 Fiber Optic Receiving Module TORX173. 2001. Datalehti. <http://www.toshiba.com/taec/components2/Datasheet_Sync/215/4884.pdf> Luettu 25.3.2012.
- 5 Vinen, Nicholas. 2012. Two TOSLINK-S/PDIF Audio Converters. Everyday Practical Electronics 10/2012, s. 10 - 16.
- 6 MCP100/101, Microcontroller Supervisory Circuit with Push-Pull Output. 2001. Datalehti. <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/11187f.pdf>> Luettu 30.3.2012.
- 7 PCM2706, Stereo Audio DAC with USB Interface, Single-ended Headphone output and S/PDIF Output. 2009. Datalehti. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcm2707.pdf>> Luettu 1.4.2012.
- 8 DIR9001, 96-kHz, 24-Bit Digital Audio Interface Receiver. 2006. Datalehti. <<http://www.ti.com/lit/ds/sles198/sles198.pdf>> Luettu 1.4.2012.
- 9 EUROQUARTZ XO91 Series Oscillators. Datalehti. <<http://www.farnell.com/datasheets/75391.pdf>> Luettu 15.4.2012.
- 10 SRC4192, 192kHz Stereo Asynchronous Sample Rate Converters. 2007. Datalehti. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/src4192.pdf>> Luettu 15.4.2012.
- 11 PCM1794A, 24-BIT, 192-kHz Sampling, Advanced Segment, Audio Stereo Digital-to-Analog Converter. 2006. Datalehti. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcm1794a.pdf>> Luettu 15.4.2012.
- 12 Rife, Douglas D. 2002. Theory of Upsampled Digital Audio. Verkkodokumentti. <<http://www.mlssa.com/pdf/Upsampling-theory-rev-2.pdf>> 16.4.2002. Luettu 3.4.2012.
- 13 Petkov, Denislav. 2012. Understanding, Measuring, and Reducing Output Voltage Ripple. Verkkodokumentti. <http://e2e.ti.com/support/power_management/simple_switcher/w/simple_switcher_wiki/2243.understanding-measuring-and-reducing-output-voltage-ripple.aspx> 14.12.2012. Luettu 3.4.2012.

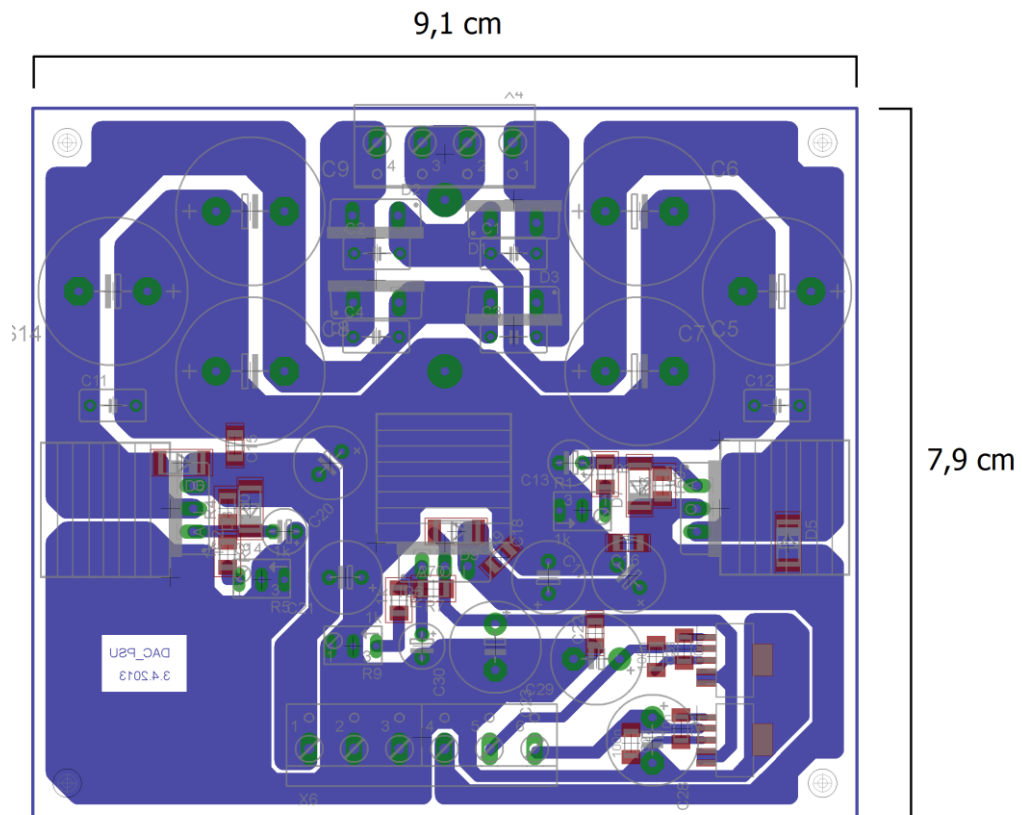
- 14 Gaddy, Larry & Kawai, Hajima. 1997. Dynamic Performance Testing of Digital Audio D/A Converters. Verkkodokumentti.
<<http://www.ti.com/lit/an/sbaa055/sbaa055.pdf>> 5/1997. Luettu 29.4.2012.
- 15 The cooKe corporation. 2005. Snr - signal-to-noise-ratio. Verkkodokumentti.
<http://www.pco.de/fileadmin/user_upload/db/download/pco_cooKe_kb_snr_0504.pdf> 4/2005. Luettu 29.4.2012.

Jännitelähteen kytkentäkaavio



D/A-muuntimen kytkentäkaavio



Jännitelähteen piirilevykuva

D/A-muuntimen piirilevykuvat

